

# **Technická univerzita v Liberci**

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Magisterský studijní program:

Strojírenská technologie

Zaměření:

Obrábění a montáž

## **Chování kompozitních materiálů různého materiálového složení na bázi reaktoplastů při vybraných technologiích obrábění**

## **Behavior of composite materials with different materials based on thermosetting composition at selected machining technologies**

**KOM - 1287**

**Bc. Adam Junek**

Vedoucí práce:

doc. Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.

Konzultant:

Ing. Miloslav Ledvina

Počet stran:

130

Počet příloh:

6

Počet tabulek:

36

Počet obrázků:

64

Počet grafů:

13

19.5. 2017

**Chování kompozitních materiálů různého materiálového složení na bázi  
reaktoplastů při vybraných technologiích obrábění**

**ANOTACE:**

Předkládaná diplomová práce poskytuje nové informace o obrábění kompozitního materiálu na bázi reaktoplastů.

Hlavním cílem předkládané práce je výběr vhodného kompozitního materiálu pro měřicí a automatizační techniku.

Nezbytné základní pojmy týkající se řešené problematiky jsou uvedeny v teoretické části práce. Do této části práce jsou zahrnuty přehledně informace o kompozitních materiálech na bázi reaktoplastů, obrábění reaktoplastů a technologii broušení.

Dosažení cíle je věnována kompletně celá experimentální část, která obsahuje informace o metodice a realizaci experimentu.

**Klíčová slova:** kompozitní materiál, epoxidová pryskyřice, broušení

Zpracovatel:	TU v Liberci, KOM
Dokončeno:	2017
Archivní označ. zprávy:	

Počet stran:	130
Počet příloh:	6
Počet tabulek:	36
Počet obrázků:	64
Počet grafů:	13

## **Behavior of composite materials with different materials based on thermosetting composition at selected machining technologies**

### **ANNOTATION:**

Diploma thesis provide a new information on the machining of composite materials based on thermosetting composition.

The main aim of the presented work is to select a suitable composite material for measuring and automation technology.

Basic terms concerning the problems solved are presented in the theoretical part of the thesis. This part includes information about composite materials based on thermosetting composition, machining of thermosetting composition and grinding technology.

Achieving the aim is devoted experimental part, which contains information about methodology and realization of the experiment.

**Key words:** composite material, epoxy, grinding process

## **MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 19.5. 2017

Podpis:

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji vedoucí diplomové práce paní doc. Ing. Štěpánce Dvořáčkové, Ph.D a konzultantům paní doc. Ing. Doře Kroisové, Ph.D. a panu Ing. Miloslavu Ledvinovi za cenné připomínky a odborné rady při vypracování této diplomové práce.

# OBSAH

ZKRATKY .....	8
1. Úvod .....	9
2. Teoretická část .....	10
2.1 Kompozitní materiály na bázi reaktoplastů .....	10
2.1.1 Epoxidová pryskyřice .....	10
2.1.2 Fyzikální a mechanické vlastnosti epoxidové pryskyřice .....	11
2.1.3 Vyztužující materiály .....	13
2.2 Obrábění reaktoplastů .....	15
2.2.1 Nástrojové materiály pro obrábění reaktoplastů .....	19
2.3 Broušení .....	21
2.3.1 Broušení reaktoplastů .....	26
3. Experimentální část .....	27
3.1 Metodika experimentu .....	27
3.1.1 Volba použitých materiálů .....	27
3.1.2 Metodika experimentu .....	33
3.1.3 Popis stroje, nástroje a měřicích přístrojů .....	35
3.1.4 Měřené parametry .....	44
3.2 Realizace experimentu .....	52
3.2.1 Drsnost povrchu .....	52
3.2.2 Rozměrová přesnost .....	57
3.2.3 Velikost řezných sil .....	63
3.2.5 Teplota .....	68
3.2.6 Součinitel teplotní roztažnosti .....	71
3.2.7 Zanesení kotouče .....	76
4. Diskuze dosažených výsledků .....	81
5. Závěr .....	92

ZDROJE .....	95
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	98
SEZNAM TABULEK .....	101
SEZNAM GRAFŮ .....	103
SEZNAM PŘÍLOH .....	104

## ZKRATKY

$a_e$	[mm]	hloubka záběru
dsk	[-]	jedná se o díl plniva na sto dílů polymeru
$F_c$	[N]	řezná síla
$F_{cN}$	[N]	kolmá řezná síla
HRC	[-]	tvrdost podle Rockwella
HV	[-]	tvrdost podle Vickerse
$n$	$[\text{min}^{-1}]$	otáčky
PVD	[-]	physical vapour deposition (fyzikální napařování)
$Q_D$	[J]	teplo deformační,
$Q_{TR}$	[J]	teplo vzniklé třením,
$Q_O$	[J]	teplo odvedené obrobkem,
$Q_T$	[J]	teplo odvedené třískou,
$Q_N$	[J]	teplo odvedené nástrojem,
$Q_P$	[J]	teplo odvedené prostředím.
Ra	$[\mu\text{m}]$	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu,
Rz	$[\mu\text{m}]$	největší výška profilu,
Rt	$[\mu\text{m}]$	celková výška profilu.
RH	[-]	Rice husk (v češtině znamená rýžová slupka)
$v_c$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	řezná rychlost



# 1. Úvod

Mezi moderní materiály používané v měřicí a automatizační technice patří v současné době také materiály kompozitní, poskytující nové a zajímavé užité vlastnosti. Jsou to částicové a vláknové systémy, mnohdy na bázi polymerů s plnivými makroskopických a mikroskopických rozměrů, ale také s plnivými nanostruktury.

Kompozitní materiály patří do skupiny materiálů se specifickými vlastnostmi. Ačkoli kompozitní materiály jsou většinou vyráběny do téměř finálních rozměrů, zvyšující se požadavky na jakost funkčních a estetických vlastností výrobků vedou k nutnosti aplikovat technologii obrábění. K nejrozšířenějším obráběcím operacím při výrobě dílců z kompozitu patří soustružení, frézování, řezání, vrtání a broušení (dokončování ploch různého tvaru). Obrábění kompozitních materiálů je obtížné a volba vhodných řezných podmínek a nástrojů vyžaduje zpravidla selektivní postup a velkou pečlivost.

Diplomová práce je zaměřena na chování kompozitních materiálů na bázi reaktoplastů při broušení jako dokončovací technologii obrobění dílce.

Hlavním cílem předkládané práce je výběr vhodného kompozitního materiálu pro měřicí a automatizační techniku (dotekové měření - doteky komparátorů, 3D měřicích strojů, koncové měrky, spároměrky, atd.) z hlediska obrobitelnosti a dosažených vlastností po broušení.

Použití typické lící epoxidové pryskyřice je navrženo s ohledem na její značné praktické uplatnění a snadné zpracování. Plniva jsou částicová i vláknová z uhlíkových materiálů a rýžových slupek. Velikosti částic nebo vláken, resp. destiček, se pohybují v oblasti mikrometrů a nanometrů.

Teoretická část práce uvádí v nezbytném rozsahu základní pojmy a vztahy související s reaktoplasty, především epoxidové pryskyřice. Dále jsou v teoretické části popsány základní pojmy k technologii broušení. Celá teoretická část se opírá o obsáhlou odbornou literaturu.

V experimentální části jsou uvedeny základní charakteristiky matrice a vybraných plniv, příprava vzorků, použitá měřicí metoda, výsledky měření, jejich analýza včetně hodnocení.

## **2. Teoretická část**

Uvedené informace týkající se kompozitních materiálů na bázi reaktoplastů a technologie broušení jsou obecně známé [1, 2, 3, 6, 7, 9, 10]. Z hlediska řešení předkládané práce je však vhodné uvést alespoň v nezbytné míře základní informace. Veškerá teoretická část se opírá o odbornou literaturu.

### **2.1 Kompozitní materiály na bázi reaktoplastů**

Kompozitní materiály jsou heterogenní materiály složené ze dvou nebo více fází, které se vzájemně výrazně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Obvykle je jedna fáze v kompozitu spojitá a druhá nespojitá. U kompozitu se spojitá fáze nazývá matrice, nespojitá výztuž. Výztuž má obvykle výrazně lepší mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnost, tvrdost atd.) a jejím hlavním úkolem je tedy zlepšení uvedených vlastností matrice. Dochází obecně ke kombinaci vysoce pevné výztuže a houževnaté matrice. Důležitou součástí kompozitu je tzv. mezifáze, která tvoří rozhraní mezi matricí a výztuží a zprostředkovává přenos vnějšího napětí z matrice do výztuže. Její vlastnosti výrazně ovlivňují soudržnost mezi matricí a výztuží, a tím tedy komplexně zlepšují mechanické vlastnosti kompozitního materiálu [12].

#### **2.1.1 Epoxidová pryskyřice**

Epoxidová pryskyřice je polymerní materiál syntetického původu a patří mezi tzv. reaktoplasty. Reaktoplasty se velmi rychle rozšířily, a to zásluhou jejich vynikajících vlastností, mezi které patří zejména elektroizolační vlastnosti, výborná adheze, chemická odolnost a minimální smršťivost při vytvrzování [11].

Epoxidové pryskyřice v mnoha případech plně nahrazují kovy a jiné materiály. Jejich zavedením do některých průmyslových odvětví se zjednodušily technologické postupy, zlepšila bezpečnost práce i jakost výrobků a urychlil se rozvoj některých průmyslových výrobních, kde provozní podmínky kladly nepřekonatelné překážky [9].

*Tabulka 1 Přehled vybraných vlastností epoxidové pryskyřice [12]*

EPOXIDOVÁ PRYSKYŘICE	
Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^3$ ]	1100-1400
Modul pružnosti [MPa]	2100-6000
Pevnost v tahu [MPa]	35-90
Deformace do lomu [%]	1-10

Epoxidové pryskyřice se vyrábějí z 85% až 90% na bázi dianu (bisfenolu A). Z jiných typů surovinové báze to jsou novolakové epoxidy, cykloalifatické epoxidy a typy na bázi dusíkatých sloučenin [10].

### **2.1.2 Fyzikální a mechanické vlastnosti epoxidové pryskyřice**

Základní epoxidové pryskyřice můžeme považovat za výchozí monomer, který získá své optimální vlastnosti až po vytvrzení, popřípadě modifikací. Plné využití jejich vlastností umožní jejich správná aplikace [10].

Epoxidové pryskyřice dosahují po vytvrzení řady důležitých vlastností, jako je mechanická pevnost, kaučukovitá elasticita, rozměrová stálost, tepelná odolnost apod., které jsou pro většinu aplikací nezbytné [10].

Vlastnosti lze ovlivnit výběrem monomerů, tj. epoxidových pryskyřic, tvrdidel a vytvrzovacím režimem. Dále lze vlastnosti ovlivnit dalšími přísadami jako jsou urychlovače, flexibilizátory (vnitřní plastifikátory), modifikátory, plniva a nastavovadla. [10].

Na vlastnosti má patrný vliv chemická struktura monomerů. Vytvrzené epoxidové pryskyřice jsou hmoty s vysokým modulem pružnosti a s vysokými pevnostmi v tahu a ohybu. Mají výbornou tvarovou stálost, výborné elektrické vlastnosti i za vysokých teplot a jsou středně navlhavé. Typ pryskyřice a typ tvrdidla ovlivňuje vlastnosti vytvrzených materiálů [10].

Výztuž (nespojité fáze) je v kompozitu nositelem mechanických vlastností a spojitá fáze matrice rozvádí mechanické namáhání rovnoměrně na všechny části výztuže, chrání je před mechanickým poškozením a chemickými vlivy, dodává materiálu odolnost proti chemickým, povětrnostním a některým fyzikálním vlivům. K velkým výhodám vyztužených plastů patří široká kombinační možnost skladby kompozitního materiálu, tj. druh výztuže, způsob a geometrie jejího uložení, typ

pojiva i poměrný obsah obou těchto složek, který dovoluje zhotovit výrobek o vlastnostech, které potřebujeme k aplikaci [10].

Vyztužením, které je dosaženo nejčastěji dosažením vyztužujících vláken, se rozumí zvýšení pevnosti a tuhosti, které vznikne uložením výztuže do matrice, přičemž musí být splněny následující podmínky - vyztužující vlákna musí být pevnější než matrice a vyztužující materiál musí mít vyšší tuhost než matrice, která se nesmí porušit dříve než vlákno [13].

V porovnání s kovovými materiály vykazují epoxidové kompozitní systémy především velmi příznivou pevnost v tahu (viz. tabulka č.2).

*Tabulka 2 Vybrané vlastnosti kovových materiálů ve srovnání s vlastnostmi laminátů [10]*

<b>Materiál</b>	<b>Hustota [kg·m<sup>-3</sup>]</b>	<b>Mez pevnosti v tahu [MPa]</b>	<b>Modul E·10<sup>-3</sup> [MPa]</b>
Ocel (nizký obsah uhlíku)	7800	350-420	200
Hliník	2700	70-245	70
Vinutý epoxidový skelný laminát	2000	560-1750	28-56
Epoxidový laminát vyztužený skleněnou tkaninou	1800	420-560	14-25
Polyesterový laminát vyztužený skleněnou tkaninou	1700	175-350	14-21

Kompozitní materiály na bázi epoxidové pryskyřice mají dobrou odolnost vůči únavě (viz. tabulka č.3). Tabulka číslo 3 porovnává hodnoty meze únavy při zatížení 10<sup>6</sup> cyklů za sekundu (v % původní hodnoty) různých materiálů.

*Tabulka 3 Hodnoty meze únavy při zatížení 10<sup>6</sup> cyklů za sekundu (v % původní hodnoty) různých materiálů*

<b>Materiál</b>	<b>Mez únavy při 10<sup>6</sup> cyklů za sekundu (v % původní hodnoty)</b>
Polyesterový skelný laminát	23
Epoxidový skelný laminát	32
Hliníková slitina	12
Titan	8

K dalším přednostem epoxidových pryskyřic patří výborná adheze k vyztužujícímu materiálu, relativně malé smrštění při vytvrzování, dobrá odolnost vůči působení chemikálií i vůči zvýšeným teplotám a dobré elektrické vlastnosti [10].

### **2.1.3 Vyztužující materiály**

Volba vyztužujícího materiálu má vliv na mechanické vlastnosti výsledného kompozitu, protože je hlavním nositelem pevnosti. Značný vliv má orientace vláken. Vyztužení je možno provést v jednom směru, dvousměrně nebo s vlákny orientovanými nahodile do všech směrů v rovině ukládané výztuže. Z toho pramení anizotropie vlastností kompozitu, která je však obvykle záměrně využívána pro dosažení požadovaných vlastností. Se zvyšujícím podílem výztuže vzrůstají mechanické vlastnosti kompozitu. Naproti tomu pro chemickou odolnost je výhodnější větší obsah matrice [10].

#### **Skelná vlákna**

Skelná vlákna jsou nejrozšířenějším vyztužujícím materiálem pro epoxidové pryskyřice. Kompozitům dodávají vysokou pevnost v tahu i tlaku, poměrně vysoký modul elasticity, dobrou tvarovou tvárnost za tepla a relativní inertnost k chemicky agresivním médiím [10]. Dále dobře odolávají působením vysokých teplot, mají nízkou nasákavost vodou, dobrou rozměrovou stabilitu a odolnost proti působení vnějšího prostředí [5].

Většina skleněných vláken se vyrábí z tzv. E–skla vyznačující se vysokým elektrickým odporem a dobrými tvárnými vlastnostmi. Naopak mají slabou chemickou odolnost proti kyselinám. Vlákna se vyrábějí ještě z tzv. A–skla, C–skla, D–skla a M–skla. Pro speciální účely se vyrábějí i jiná skla, např. L–sklo [5].

*Tabulka 4 Typické vlastnosti skleněných vláken při normální teplotě [5]*

Vlastnost	E-sklo	A-sklo	C-sklo	D-sklo	M-sklo	S a R sklo	Tavený křemen
Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	2540	2480	2490	2160	2890	2480	2200
Teplota při bodu měknutí [ $^{\circ}\text{C}$ ]	846	695 - 720	750	770	-	970	1667
Modul pružnosti v tahu E [MPa]	72000	74000	-	54000	112000	88000	75000
Pevnost v tahu $R_m$ [MPa]	3500	3100	3200	2500	3500	4900	nad 6000
Specifické teplo [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	798	-	789	735	-	739	714

Modul pružnosti v tahu skleněných vláken je přibližně stejně velký jako u hliníku a činí asi jednu třetinu hodnoty oceli, pevnost v tahu je vyšší než u většiny organických i anorganických vláken a je většinou podstatně vyšší než u oceli (v kompaktní formě). Teplené vlastnosti skleněných vláken překonávají tepelné vlastnosti jiných materiálů. Ani dlouhodobé trvalé namáhání při 250  $^{\circ}\text{C}$  nesnižuje hodnoty mechanických vlastností. Tepelná vodivost je naproti tomu vyšší než u ostatních materiálů, ale podstatně nižší než u kovů. Součinitel teplotní délkové roztažnosti skleněných vláken je nižší než u většiny konstrukčních materiálů [13].

### **Uhlíková vlákna**

Uhlíková vlákna jsou technická vlákna s velkou pevností, modulem pružnosti, tepelnou odolností a s nízkou měrnou hmotností. Pevnost a modul pružnosti jsou závislé na stupni orientace uhlíkových vrstev a na výskytu vadných míst, která vznikla ve vláknech během výroby. Vlákna získaná při teplotě 900  $^{\circ}\text{C}$  až 1500  $^{\circ}\text{C}$  jsou pevnější a nazývají se vysokopevnostní uhlíková vlákna. Další karbonizací vláken při teplotě 2000  $^{\circ}\text{C}$  až 2800  $^{\circ}\text{C}$  se získají vlákna grafitová, která mají menší tahovou pevnost, jsou dražší, ale mají vyšší modul pružnosti v tahu a nazývají se vysokomodulová vlákna [5].

Tabulka 5 Vlastnosti uhlíkových vláken [5]

Vlastnost	Vysokopevnostní	Vysokomodulová
Hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	1790	1800
Pevnost v tahu [MPa]	5400	2350
E-modul $R_m$ [MPa]	290000	358000
Tažnost [%]	1,7	0,6
Specifický elektrický odpor [ $\text{ohm} \cdot \text{m}^{-1}$ ]	-	$1 \cdot 10^{-5}$
Koeficient tepelné roztažnosti [ $10^{-6} \text{ K}$ ]	-	-0,5
Tepelná vodivost [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]	-	710

Uhlíková vlákna mají proti syntetickým vláknům progresivní deformační chování, tzn. se zvyšujícím se zatížením stoupá hodnota E-modulu. Zároveň mají i velké hodnoty E-modulu i pevnosti až do teploty 500 °C. Mezi další významné vlastnosti patří dobrá elektrická a tepelná vodivost, mimořádně vysoká korozní odolnost. Uhlíková vlákna jsou ve srovnání se skleněnými vlákny silně anizotropní. Anizotropie ovlivňuje také součinitele teplotní roztažnosti, hodnoty měřené ve směru vláken a kolmo na vlákna jsou velmi rozdílné [13].

Uhlíková vlákna jsou za normálních podmínek velmi křehká a při zpracování se snadno lámou. Proto se při zpracování povrchově upravují apretací směsí na bázi epoxidové pryskyřice. Ta slouží jako ochrana při zpracování a současně jako prostředek pro zlepšení vazby mezi vláknem a matricí. Uhlíková vlákna mají vysokou odolnost proti dlouhodobému dynamickému namáhání. Dynamické vlastnosti laminátu s uhlíkovými vlákny jsou lepší než u všech ostatních materiálů (např. hliníku, oceli). I když jsou uhlíková vlákna hořlavá, je rychlost hoření kompozitu obsahujícího 90 % uhlíkových vláken velmi pomalá [13].

## 2.2 Obrábění reaktoplastů

Z obrábění kovových materiálů, kde se základní principy nemění (např. teorie vzniku třísky), je v dnešní době možné odhadnout chování dalších typů materiálů a jejich řezné podmínky se volí na základě dlouholetých zkušeností s klasickými materiály. Do výroby reaktoplastů vstupuje mnoho proměnných, které mají zásadní vliv na vlastnosti finálního výrobku a volbu správné technologie. Z tohoto důvodu je určování správných řezných podmínek pro obrábění těchto materiálů velmi složité.

Reaktoplasty na rozdíl od kovů a jejich slitin disponují rozdílnými vlastnostmi, na které se musí nahlížet i při obrábění. Mezi největší rozdíly mezi kovy a reaktoplasty patří [16]:

- malá tepelná vodivost – veškeré teplo způsobené při obrábění odchází do nástroje, tím dochází k většímu tepelnému zatížení břitu nástroje a za následek to má intenzivnější opotřebení nástroje,
- vyšší tepelná roztažnost – způsobuje změnu rozměru součásti při obrábění,
- velká adheze (přilnavost) – dochází k přilnavosti reaktoplastů k břitu nástroje a při optimálních řezných podmínkách dochází k opotřebení břitu nástroje především adhezním otěrem,
- abrazivní otěr – u tohoto otěru dochází k opotřebení břitu nástroje při obrábění vyztužených plastů,
- tvorba třísky – je ovlivněna strukturou materiálu:
  - třísky u nevyztužených plastů se tvoří pomocí plastické deformace, podobným způsobem jako u ocelí,
  - třísky u vyztužených plastů se tvoří křehkým lomem nebo štěpením, podobné jako u litiny,
- vyšší teploty – při vyšších teplotách reaktoplasty uhlavnatí,
- zajištění vysoké řezivosti – aby byla zajištěna vysoká řezivost, musí být všechny řezné nástroje dokonale naostřeny.

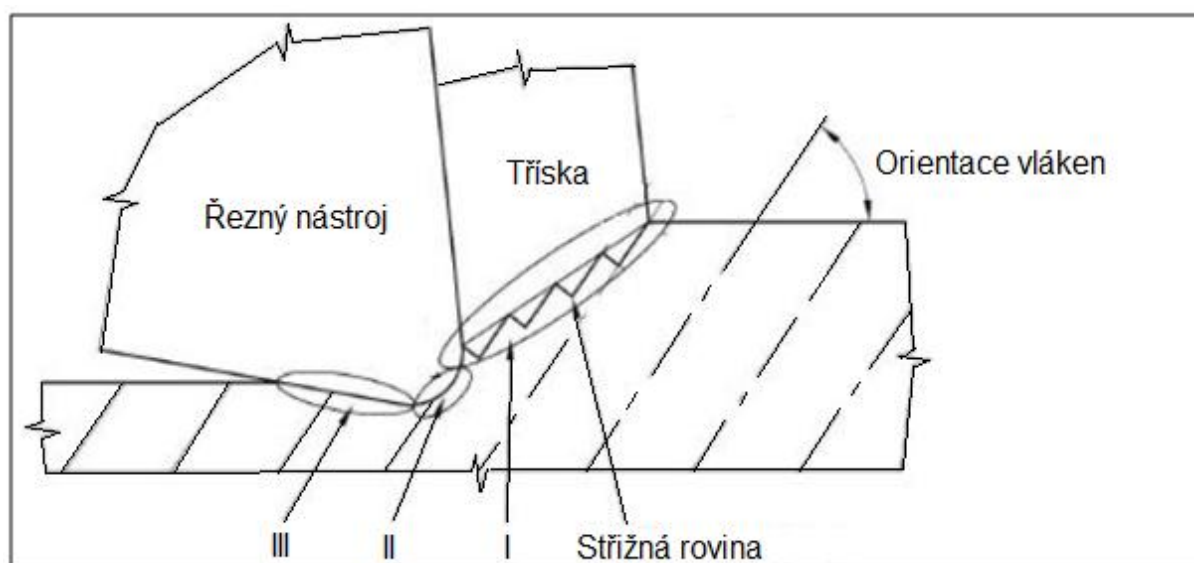
Především vlastnosti výztuže a matrice mají za následek náročnost obrábění reaktoplastů [3]. U reaktoplastů se velmi často jako výztuž používají skelná vlákna, kde sklo má v Mohsově stupnici (Mohsova stupnice tvrdosti vyjadřuje schopnost jednoho materiálu rýt do druhého) podobnou tvrdost jako slinutý karbid, karbid křemíku nebo karbid boru. Proto je důležitá správná volba nástrojového materiálu, geometrie nástroje a řezných podmínek.

Náročnost nespočívá pouze ve vlastnosti výztuže, ale také v matrici. Matrice špatně odvádí teplo z místa řezu. U kovových materiálů většina tepla odchází v tříse, u obrábění reaktoplastů většina tepla vstupuje do nástroje. Reaktoplasty mají nízkou tepelnou odolnost, a proto při vyšších teplotách nejsou stálé. Dojde-li k překročení tzv. kritické teploty, na povrchu se začnou objevovat spálené oblasti. Podle teploty tání matrice se často určuje řezná rychlost a posuvy při obrábění [16].



Při obrábění reaktoplastů se nevytváří kontinuální tříska, ale vznikají drobné částičky třísky, které se mohou šířit z místa řezu do prostoru. Tyto částičky jsou pro člověka škodlivé, proto je nutné zajistit jejich odvod z místa řezu. Jednou z možností je konstrukce odsávacího zařízení nebo použití procesní kapaliny, která drobné částice třísky odplaví.

Jsou-li vyztužující vlákna orientována jednosměrně, lze mechanismus vzniku třísky schematicky znázornit modelem (viz. obrázek č.1).



Obrázek 1 Mechanismus vzniku třísky [7]

Oblast I: V této oblasti dochází k vlastnímu oddělení třísky od materiálu. Trhlinky vznikající při zatížení vláken břitem nástroje a šíří se kolmo na osy vyztužujících vláken [7].

Oblast II: V důsledku negativního úhlu čela a tím i řezu, nevzniká povrch obrobené plochy řezáním, ale především tvářením, čímž jsou jak vlákna, tak matrice zatlačována pod břit nástroje [7].

Oblast III: Vlivem pružných deformací se po odlehčení nástroje část povrchové vrstvy vrací nazpět, což zvyšuje tření mezi nástrojem a již obrobenou plochou [7].

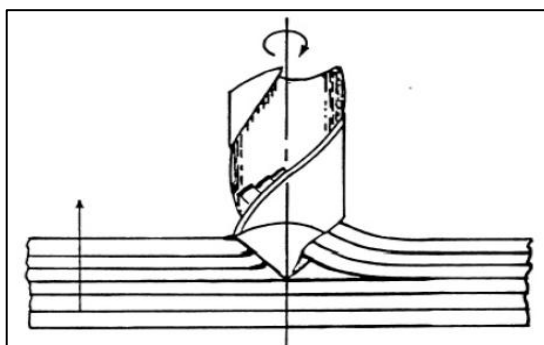
Při použití procesní kapaliny nedochází jen k odplavení drobných částic třísky, ale také pomocí svého chladicího účinku snižuje teplotu v místě řezu. Nelze ale použít u všech reaktoplastů s ohledem na nasákavost reaktoplastů. Procesní kapalina také snižuje vliv abraze skelných vláken na nástroji. Po použití kapaliny se musejí obráběné dílce vysušit pro zajištění elektroizolačních vlastností [7]. Při obrábě-

bění reaktoplastů se nejčastěji používá chlazení tlakovým vzduchem, výjimečně emulzí [17].

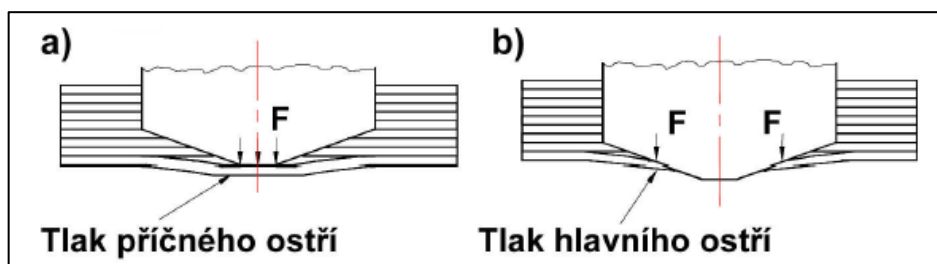
Určení správných řezných podmínek pro obrábění reaktoplastů je velmi složité, protože do výroby reaktoplastů vstupuje mnoho proměnných, které mají vliv na vlastnosti finálního reaktoplastu a volbu správné technologie [1].

Stanovení vhodných řezných podmínek je náročnější než u obrábění ocelí. Při obrábění reaktoplastů se musí dbát, aby nevznikaly vysoké teploty a tím nedošlo k ovlivnění matrice. Zároveň je nutné zajistit vysoké rychlosti, aby nedocházelo k vytrhávání vláken [1]. Velikost řezné síly závisí především na hloubce řezu a na úhlu orientaci vláken [6]. Zvětšením hloubky řezu se sníží vývin tepla v materiálu [2]. Špatnou volbou řezných podmínek může dojít k popraskání obrobené plochy nebo z povrchu obrobku mohou vystupovat pramence nedělené třísky vláken a pryskyřice, které se mnou namotávat na nástroj.

Při obrábění reaktoplastů může docházet v povrchové vrstvě k mnoha poškozením materiálu, které se svým vzhledem, mechanismem vzniku a porušováním se liší od kovových materiálů. Nejčastějším poškozením je delaminace, která nejčastěji vzniká u frézování a vrtání. Dochází k ní při vstupu i výstupu nástroje z materiálu. Při vstupu nástroje do materiálu (viz. obrázek č.2) dochází k odlupování povrchové vrstvy, při výstupu (viz. obrázek č.3) se odlupuje neobrobená vrstva pod nástroj [7].



Obrázek 2 Delaminace při vstupu vrtáku do materiálu [7]



Obrázek 3 Delaminace při výstupu vrtáku z materiálu [7]

Zabránit delaminaci lze vhodným nastavením řezných podmínek nebo stavem ostří nástroje. Není-li nástroj dostatečně ostrý, vlákna nejsou deformována stříhem, ale mají sklon se před ostřím ohýbat a dále jsou vytahována z matrice [15]. Účinný způsob, jak zabránit vzniku delaminace při frézování, je volba nástroje s velkým úhlem čela i hřbetu. Pozitivní geometrii a vysokou životnost v sobě spojují nástroje osazené břity z polykrystalického diamantu, které jsou sice křehčí, ale jsou schopny z místa řezu odvádět více tepla než nástroje karbidové. Vhodnou variantou je užití karbidových nástrojů s PVD diamantovým povlakem [8].

### **2.2.1 Nástrojové materiály pro obrábění reaktoplastů**

Volba vhodného nástroje a nástrojového materiálu pro obrábění reaktoplastů je velmi důležitá. Při volbě nástroje pro obrábění je nutné brát v úvahu abrazivní vlastnosti výztuže, tzn. že je nutné volit co nejvíce otěruvzdorný materiál nástroje. Většina reaktoplastů má velice nízkou tepelnou vodivost, vznikající teplo tedy neodchází ve formě třísky, ale je ve velké míře odváděno nástrojem. Optimální nástroj pro obrábění kompozitních materiálů tedy musí mít jak odolnost proti abrazivnímu opotřebením, tak tepelnou odolnost (vodivost) [3].

Při volbě geometrie břitu nástroje je nutné brát v úvahu specifické vlastnosti plastů. Podle těchto vlastností se u nástroje volí úhel čela, úhel sklonu ostří a úhel hřbetu [4]. Je snaha dosáhnout kontinuální třísky, aby nedocházelo k vytváření tepla a deformaci obrobku. Proto se volí takové nástroje, které mají kritický úhel čela anebo velký úhel čela, což nám zaručí vytváření kontinuální třísky s minimální deformací povrchu [2].

Pro obrábění reaktoplastů je důležité používat ostré nástroje. Vhodně zvolený materiál musí zajistit ostrý a hladký břit po co nejdelší dobu obrábění. Naostřený břit je důležitý, aby byla tříska důkladně odřezávána. Opotřebený břit třísku v místě řezu pouze drtí a vytrhává drobné kousky reaktoplastu z povrchu obrobku. Tím se dosáhne nízké kvality obrobeného povrchu [17].

Nástrojové materiály jsou nejčastěji používány rychlořezná ocel, slinuté karbidy a polykrystalický diamant.

### **Rychlořezné oceli**

Nástroje z rychlořezné oceli jsou pro obrábění reaktoplastů používány pouze v omezené míře. Jejich tvrdost je ve srovnání s jinými nástrojovými materiály nižší

a tím i odolnost proti abrazivnímu opotřebení, které je u obrábění reaktoplastů důležité. Další významná vlastnost pro nástrojové materiály, tepelná vodivost, je u rychlořezných ocelí relativně nízká, třikrát až čtyřikrát nižší než u slinutých karbidů. Nízká tepelná vodivost způsobuje nízkou trvanlivost nástroje. Aplikací otěruvzdorných povlaků se zvýší trvanlivost nástroje, ale pouze do jisté míry [3].

Nástroje z rychlořezné oceli jsou vhodné pro obrábění reaktoplastů při kusové výrobě, kde nejsou kladeny vysoké požadavky na kvalitu povrchu obrobku. A to zejména z důvodu pořizovací ceny [1].

### **Slinuté karbidy**

Nástroje ze slinutých karbidů dosahují v porovnání s nástroji z rychlořezné oceli delší trvanlivosti i lepší tepelné vodivosti. Oproti nástrojům z rychlořezné oceli se dosáhne také kvalitnějšího povrchu, ale za vyšší pořizovací cenu, která by se promítla do konečné ceny obrobku. Mechanické vlastnosti slinutých karbidů jsou závislé především na obsahu pojiva (nejčastěji kobaltu) a velikosti zrna karbidické fáze [3].

Na obrábění reaktoplastů je vhodné použít slinuté karbidy s jemnozrnnou strukturou, které mají vyšší tvrdost, díky které lépe odolávají opotřebení [1]. Rostoucí velikost zrn a větší podíl kobaltu zvyšují houževnatost slinutého karbidu. Nižší houževnatost nástroje je nutné zohlednit např. při nestabilním obrábění, kdy je nástroj cyklicky zatěžován [3].

### **Polykrystalický diamant**

Nejlepších výsledků při obrábění kompozitních materiálů dosahují nástroje osazené řeznými prvky z polykrystalického diamantu nebo opatřené diamantovými povlaky. Především vysoká tvrdost diamantu, která umožňuje odolávat vysokému abrazivnímu opotřebení vyztužujících vláken a vynikající tepelná vodivost, která zaručuje rychlý odvod tepla z oblasti řezu, jsou předpokladem pro vysokou kvalitu obrobeného povrchu a dlouhou trvanlivost nástroje. Trvanlivost je mnohonásobně vyšší než u nástrojů ze slinutých karbidů [3].

Ostrý břit, který vydrží po dlouhou dobu obrábění, poskytuje chladnější řez a snižuje tvorbu delaminace, protože při nadměrném opotřebení břitu se vlákna spíše odlamují, místo aby byla běžně řezána. Vhodnou aplikací nástrojů z polykrystalického diamantu při obrábění kompozitních materiálů dochází ke zvýšení řezných

podmínek, zejména řezné rychlosti a následně produktivity [3]. Nevýhodou použití polykrystalického diamantu je vysoká pořizovací cena.

Zejména pro lepší odvod třísek a prachu jsou po obvodu nástroje vytvořeny drážky. Pokud by nástroj drážky neměl, docházelo by k zanášení pracovního prostoru, a tak ke vzniku vysokých teplot. Obráběná plocha by neměla přesáhnout 50% průměru nástroje, aby nedocházelo k zanášení pracovní plochy nástroje [1].

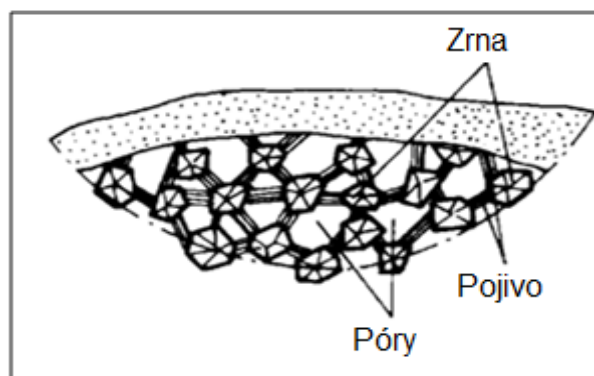


*Obrázek 4 Opatřebený nástroj s drážky s vrstvou zrn z PKD [1]*

## **2.3 Broušení**

Broušení je základní dokončovací technologií obrábění. Tato technologie se uplatňuje, pokud je požadována vysoká kvalita povrchové vrstvy obrobku, vysoká přesnost obrobených povrchů z hlediska rozměrů a tvarů, minimální hloubka záběru, možnosti obrábění velmi tvrdých materiálů a vysoká produktivita.

Pro broušení se používají zrna, která mohou být volná (rozptýlena v pastě nebo oleji) nebo vázána pojivem do požadovaného tvaru, nejčastěji do brousicího kotouče. Jedná se o mnohabřité nástroje, kde každé zrno brusiva má jiný geometrický tvar. Zrna jsou v brousicím kotouči umístěna náhodně a jsou spojena pojivem, přičemž se mezi zrny a pojivem vyskytují volná místa, nazývají se póry (viz. obrázek č.5).



Obrázek 5 Ukázka brousicího kotouče [22]

Zrna brusiva nemají zcela stejnou velikost, mají různou geometrii a zpravidla záporný úhel čela. Jednotlivá tvrdá zrna brusiva tvoří břity a pouze část zrn na povrchu brousicího kotouče je aktivních. Broušení probíhá za specifických podmínek, mezi které patří vysoká řezná rychlost, negativní úhel čela, malá tloušťka třísky připadající na zrno. Kromě plastických deformací se při tvorbě třísky také výrazně projevují třecí síly a důsledkem jsou vysoké okamžité teploty v oblasti řezání 1000 - 1500 °C. Zrna brusiva se otupují, vylamují a v důsledku specifických podmínek dochází k tzv. samoostření.

## Brusivo

Materiály zrn brusiva se vyznačují vysokou tvrdostí, pevností i odolností proti působení vysokých teplot. Zrna brusiva se vyrábějí z nejtvrdějších známých materiálů a pro strojní broušení kovových materiálů se používají výhradně umělá brusiva, mezi která patří umělý korund, karbid křemíku, karbid bóru, kubický nitrid bóru a diamant. Přehled umělých brusiv a jejich mikrotvrdost, Knoppova tvrdost a teplotní odolnost jsou uvedeny níže (viz. tabulka č. 6).

Tabulka 6 Přehled umělých brusiv [22]

Brusivo a chemický vzorec		Mikrotvrdost HM (10 <sup>3</sup> MPa)	Knoppova tvrdost	Teplotní odolnost (°C)
Diamant	D	86 až 100	5600	max. 720
Kubický nitrid boru	CBN	80 až 95	4700	1400 až 1700
Borkarbid	B <sub>4</sub> C	40 až 45	2250	700 až 800
Siliciumkarbid	SiC	33 až 36	2100	1300 až 1450
Elektrokorund	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22 až 24	1620	1700 až 1800

## **Zrnitost**

Zrnitost je podle normy ČSN ISO 525 dána podle počtu ok síta na délce 1 anglického palce (25,4 mm), kterými zrna dané velikosti ještě propadla. Zrna brusiva se nejčastěji vyrábějí z krystalových drúz vyjmutých z pece, následně se očistí, drtí a třídí na korekčních sítích. Velikost zrn významně ovlivňuje finální drsnost povrchu broušeného obrobku.

## **Tvrdost**

Tvrdost nástroje je dána odporem, který klade pojivo proti vylomení zrna brusiva. Čím vyšší je tvrdost obrobku a čím je větší plocha styku nástroje a obrobku, tím volíme menší tvrdost brousicího kotouče.

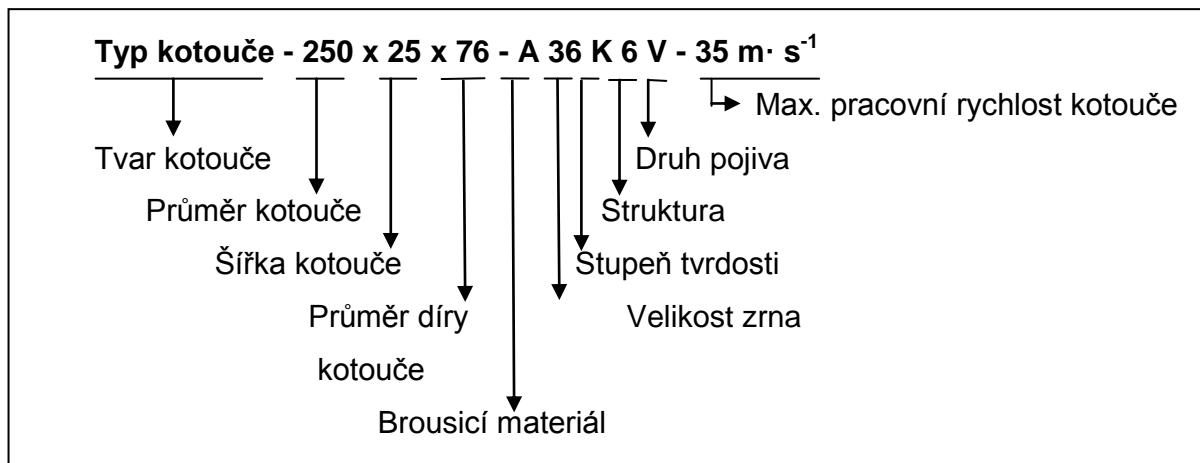
## **Sloh (struktura)**

Sloh (struktura) charakterizuje poměr zrn brusiva, pojiva a pórů. Sloh se ovlivňuje přísadami v pojivu při výrobě brousicího kotouče. Z hlediska slohu se používají tři slohy brousicích kotoučů - hutný (pro obrobky hladké, tvrdé a křehké), pórovité (pro houževnaté obrobky) a zvláště pórovité (pro broušení obrobků, které se při broušení nesmí příliš zahřát).

## **Pojivo**

Pojivo zajišťuje požadovaný tvar nástroje a zásadně ovlivňuje jeho vlastnosti. Pojivo spojuje zrna brusiva tak, aby docházelo k uvolňování zrn opotřebovaných a otupených, čímž je zajištěno, že se do záběru dostávají zrna nová a ostrá - tento mechanismus nazýváme samoostřicí schopnost brousicího nástroje. Pojiva se dělí na organická (umělá pryskyřice, pryž, šelak, kliš), anorganická (keramická, magnezitová, silikátová) a kovová.

Pro technologii broušení je důležité značení nástroje - brousicího kotouče. Přehled značení brousicího kotouče je uvedeno níže (viz. obrázek č.6)



Obrázek 6 Značení brousicího kotouče [22]

Brousicí kotouče se upínají mechanicky pomocí přírub nebo přitmelením. Před upnutím je důležité vyvážení brousicího kotouče. Brousicí kotouč musí být bezvadně vyvážen, tzn. že hmota nástroje musí být rovnoměrně rozdělena tak, aby těžiště rotujícího kotouče bylo přesně v ose vřetena. Vyvážený brousicí kotouč zabraňuje vzniku chvění, a tak umožňuje dosáhnout požadované kvality povrchu u broušené součásti a dále zabraňuje namáhání (poškození) ložisek vřetena. U nevyváženého kotouče mohou odstředivé síly při velkých otáčkách vřetena vést až k roztržení nástroje.

Během broušení dochází k opotřebení brousicího kotouče. Intenzita a forma opotřebení břitu je závislá především na mechanických vlastnostech materiálu obrobku a na řezných podmínkách (rozhodující je řezná rychlost a hloubka záběru). Rozlišují se dvě opotřebení - mikroopotřebení (břit zrna brusiva v průběhu procesu obrábění ztrácí svůj původní tvar) a makroopotřebení (uvolňování zrn brusiva z vazby vede ke změně makrorozměrů celého brousicího kotouče).

### Řezné podmínky

- hlavní řezný pohyb koná nástroj:

$$\begin{aligned} \text{- řezná rychlost: } v_c &= \pi \cdot D \cdot n \text{ [ m.s}^{-1} \text{ ]}, \\ v_c &= 20 - 120 \text{ m.s}^{-1}, \end{aligned}$$

- vedlejší řezné pohyby koná obrobek:

$$\begin{aligned} \text{- posuv: } v_f &= 8 - 35 \text{ m.min}^{-1}, \\ \text{- hloubka záběru: } &\text{rovinné broušení: } a_e = 0,005 - 0,04 \text{ mm}, \\ &\text{obvodové broušení: } a_e = 0,001 - 0,075 \text{ mm/ot.} \end{aligned}$$



## Síly při broušení

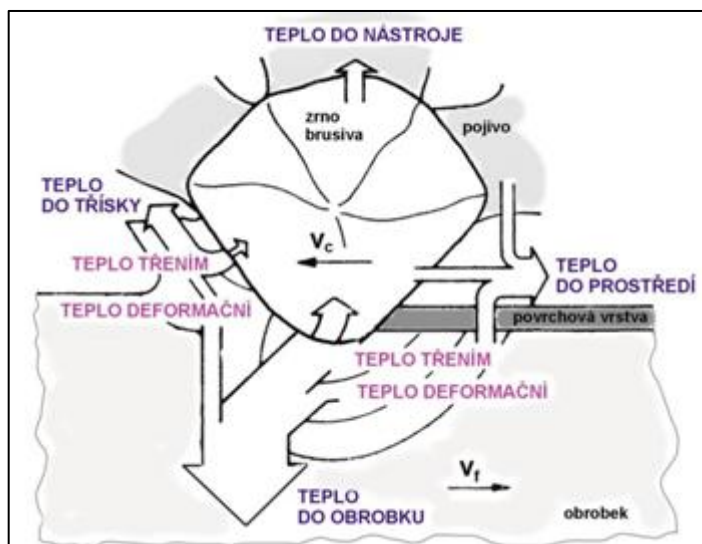
S rostoucí pevností obráběného materiálu se zvětšuje řezná síla  $F_c$  a kolmá řezná síla  $F_{cN}$ . Se zvětšující se hloubkou záběru  $a_e$  se zvětšuje řezná síla  $F_c$  a kolmá řezná síla  $F_{cN}$ . Kolmá řezná síla (v radiálním směru)  $F_{cN}$  je vždy větší než řezná síla (v tangenc. směru)  $F_c$ . Proces broušení ovlivňují řezné podmínky, které určují teplotu a rychlost deformace.

## Teploty při broušení

Při broušení platí vztah, kde teplo vzniklé se musí rovnat teplu odvedenému. Teplo vzniká deformací a třením, naopak teplo odchází do obrobku, třískou, nástrojem a prostředím.

$$Q_D + Q_{TR} = Q_O + Q_T + Q_N + Q_P, \quad (1)$$

kde:  $Q_D$  teplo deformační,  
 $Q_{TR}$  teplo vzniklé třením,  
 $Q_O$  teplo odvedené obrobkem,  
 $Q_T$  teplo odvedené třískou,  
 $Q_N$  teplo odvedené nástrojem,  
 $Q_P$  teplo odvedené prostředím.

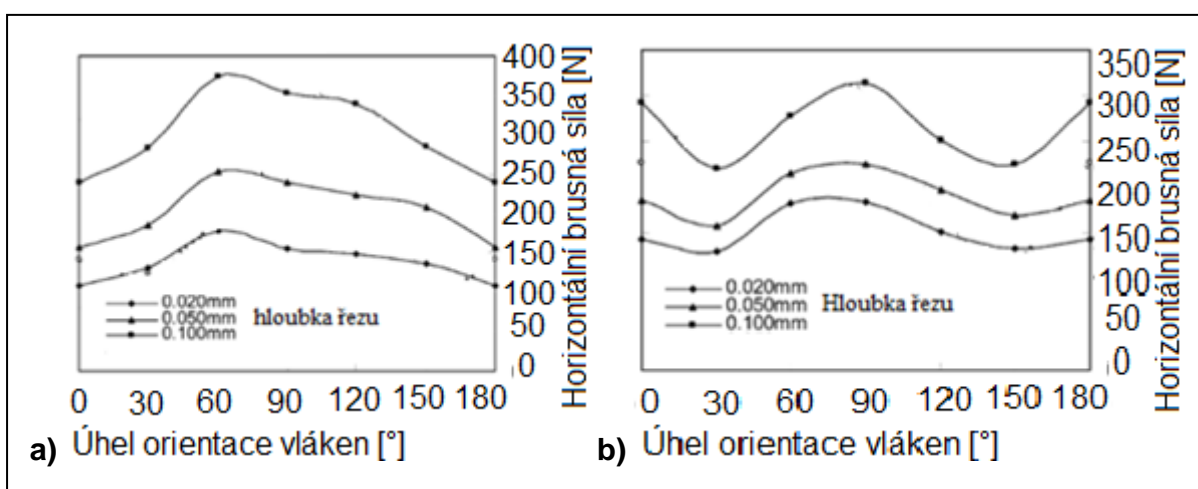


Obrázek 7 Tepelná bilance procesu broušení [22]

### 2.3.1 Broušení reaktoplastů

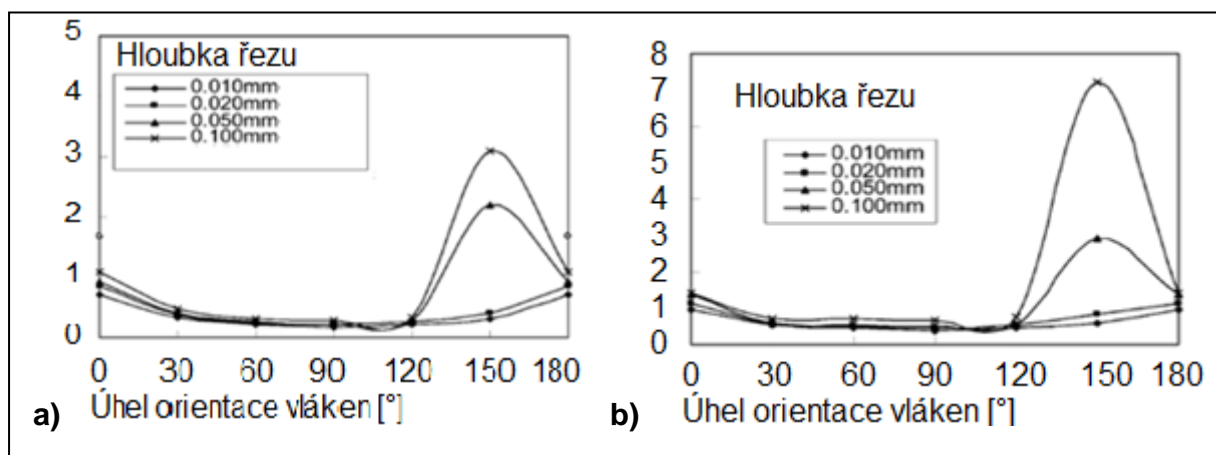
Pro technologii broušení se používají brousicí kotouče o velké zrnitosti. Různé pryskyřice vyžadují značně rozdílné podmínky broušení. Při broušení se používá procesní kapalina kvůli svému chladicímu účinku a zároveň brání rozšiřování prachu do okolí a zajišťuje jeho opláchnutí z obrobku [4] [6].

Největší vliv na velikost řezné síly a drsnost povrchu má úhel orientace vláken. U velikosti řezné síly má značný vliv také hloubka záběru. Níže (viz. obrázek č.8) jsou znázorněny závislosti horizontální a vertikální brusné síly na úhlu orientace vláken pro různé hloubky řezu.



Obrázek 8 Závislost horizontální (a) a vertikální (b) brusné síly na úhlu orientace vláken pro různé hloubky řezu [6]

Hodnota horizontální brusné síly stoupá společně s úhlem orientace vláken. Při dosažení hodnoty 60 ° horizontální síla dosahuje maxima. S dalším nárůstem úhlu orientace vláken mírně klesá až do hodnoty 180 °. Vysoké hodnoty této síly je dosahováno pro úhel okolo 0 ° nebo 90 °. Nejmenší vertikální síla se objevuje při úhlu natočení vláken okolo 30 ° a 150 °. Z obou grafů je patrné, že pro větší hloubku řezu, jsou větší i brusné síly [18]. Níže (viz. obrázek č.9) je vidět vliv úhlu natočení vláken na podélnou a příčnou drsnost.



Obrázek 9 Závislost podélné (a) a příčné (b) drsnosti na úhlu orientace vláken [6]

Z grafu je zřejmé, že při překročení hranice úhlu natočení  $120^\circ$  se náhle zvýší drsnost a při  $150^\circ$  začne znovu klesat. Drsnost tedy dosahuje nejvyšších parametrů mezi  $120^\circ$  a  $180^\circ$ . Nejlepší drsnost byla získána při úhlu natočení vláken  $90^\circ$  až  $120^\circ$  a hloubka řezu zde má nejmenší vliv [18].

### 3. Experimentální část

Experimentální část přináší základní informace o charakteristice matrice, vybraných plnivech, přípravě vzorků, použitých měřicích metodách, výsledcích měření, jejich analýze a hodnocení.

#### 3.1 Metodika experimentu

Metodika experimentu popisuje volbu použitých materiálů, metodiku experimentu, měřené parametry, stroj, nástroj a měřicí přístroje.

##### 3.1.1 Volba použitých materiálů

Tato kapitola se zabývá výběrem matrice a její základní charakteristikou, výběrem plniv a přípravou vzorků pro realizaci experimentu.

## Výběr matrice a její základní charakteristiky

Epoxidové pryskyřice na bázi dianu vytvrzované běžnými tvrdidly jsou tuhé až křehké hmoty se sklonem k praskání. Uvedené nedostatky se odstraňují modifikací (plastifikací a flexibilizací), čímž se dosahuje vyšší pružnosti, ohebnosti, rázové houževnatosti a nižšího vnitřního pnutí. Při vnější plastifikaci se aditiva při vytvrzování nezabudovávají do struktury, ale pouze od sebe oddalují jednotlivé vytvrzované makromolekulární řetězce, čímž zajišťují jejich zvýšenou pohyblivost. Vnitřní plastifikátory (flexibilizátory) se se svými reaktivními složkami zabudovávají při vytvrzování přímo do struktury makromolekulárních řetězců a mění charakter původní hmoty [24].

Ke zlepšení zpracovatelských vlastností epoxidových pryskyřic i vlastností konečných výrobků se používají minerální částicová plniva. Použitím plniv je možné prodloužit dobu zpracovatelnosti, zmenšit smrštění při vytvrzování, příznivě ovlivnit vzrůst teploty reakční směsi stejně jako ovlivnit koeficient teplotní roztažnosti, chemickou odolnost a tvarovou stálost za tepla. Při výběru vhodného plniva je třeba dbát na řadu parametrů ovlivňujících možnosti jejich použití, jako je např. měrný povrch, velikost a tvar částic, vlhkost absorbovaná na povrchu, spolu s vlastnostmi požadovanými od konečného výrobku s přihlédnutím ke vhodné technologii zpracování [24].

Vytvrzené epoxidové pryskyřice jsou hmoty s vysokým modulem pružnosti, vysokými pevnostmi v tahu a v ohybu. Mají výbornou tvarovou stálost, velmi dobré elektrické vlastnosti i za vysokých teplot a jsou středně navlhavé. Epoxidové pryskyřice se s výhodou využívají jako licí hmoty [24].

U deseti vzorků použitých pro experiment byla jako matrice vybrána epoxidová pryskyřice ChS Epoxy 520 a u dvou vzorků epoxidová pryskyřice ChS Epoxy 521. U epoxidové pryskyřice ChS Epoxy 520 se jedná o nízkomolekulární epoxidovou pryskyřici připravenou reakcí bisfenolu A s epichlorhydrinem bez modifikujících složek. U druhé epoxidové pryskyřice, ChS Epoxy 521, se jedná o nízkomolekulární epoxidovou pryskyřici připravenou reakcí bisfenolu A s epichlorhydrinem s modifikujícími složkami. Níže (viz. tabulky č.7 a č.8) jsou uvedeny vlastnosti použitých epoxidových pryskyřic.

*Tabulka 7 Vlastnosti epoxidové pryskyřice ChS Epoxy 520*

Parametr	Hodnota
Použité tvrdidlo	Diethylentriamin
Poměr hmotnostní (pryskyřice : tvrdidlo P11)	100:11
Podmínky vytvrzování [°C/hod]	23±5 / 24
Mez pevnosti v tahu [MPa]	min. 40
Mez pevnosti v ohybu [MPa]	min. 90
Rázová houževnatost [kJ/m <sup>2</sup> ]	min. 10
Viskozita při 25 °C [Pa·s]	12,0-14,5
Hustota při 20 °C [kg·m <sup>-3</sup> ]	1160 - 1170
Obsah epoxidových skupin [mol·kg <sup>-1</sup> ]	5,2-5,5
Epoxidový hmotnostní ekvivalent [kg·mol <sup>-1</sup> ]	0,182-0,192
Vzhled	Nažloutlá čirá viskózní kapalina

*Tabulka 8 Vlastnosti epoxidové pryskyřice ChS Epoxy 521*

Parametr	Hodnota
Použité tvrdidlo	Diethylentriamin
Poměr hmotnostní (pryskyřice : tvrdidlo P11)	100:10
Podmínky vytvrzování [°C/hod]	23±5 / 24
Mez pevnosti v tahu [MPa]	min. 30
Pevnost v tlaku [MPa]	min. 60
Pevnost v tahu [MPa]	min. 30
Tažnost [%]	min. 1,5
Viskozita při 25 °C [Pa·s]	0,6-0,9
Hustota při 20 °C [kg·m <sup>-3</sup> ]	1160 - 1170
Obsah epoxidových skupin [mol·kg <sup>-1</sup> ]	4,85 - 5,1
Epoxidový hmotnostní ekvivalent [kg·mol <sup>-1</sup> ]	0,196 - 0,206
Vzhled	Nažloutlá čirá viskózní kapalina

Všechny vzorky byly vytvrzeny tvrdidlem P11. Tvrdidlo P11 je rychlé tvrdidlo s kratší dobou zpracovatelnosti. Vyznačuje se dolepem na povrchu po vytvrzení. Dolep lze odstranit omytím vodou nebo 3% roztokem kyseliny citrónové. Vytvrzená kompozice zůstává transparentní.

## Výběr plniva

Plniva v licích epoxidových pryskyřicích ovlivňují řadu fyzikálních a mechanických vlastností. Těmito plnivy je možné např. snížit koeficient teplotní roztažnosti čistého polymeru, zvýšit jeho tepelnou odolnost nebo elektrickou vodivost. Použitím plniv se mění viskoelastické chování polymerního materiálu, obvykle klesá mez pevnosti v tahu a tažnost, roste modul pružnosti a pevnost v tlaku [24].

Chování plniv v polymerní matrici je dáno jejich podstatou, hustotou, tvarem (částice, vlákna), velikostí, strukturou a hmotnostním zastoupením [24].

U dvou materiálů, kde byla použita jako základní matrice epoxidová pryskyřice ChS Epoxy 521, nebyla použita žádná plniva. U materiálů, kde se jako základní matrice použila epoxidová pryskyřice ChS Epoxy 520, se použila na jeden materiál uhlíková vlákna a na zbylých devět materiálů namleté rýžové slupky (viz. obrázek č.10), kde se měnilo množství rýžových slupek. Rýžová slupka má zkratku RH, která je z angličtiny (rice husk). Číslo u pryskyřice značí její typ. Hustota vzorků nebyla v žádném případě stanovována a tvar plniva je ve všech případech stejný, přičemž se jedná o pravidelné částice.



*Obrázek 10 Slupky, organicko-anorganické plnivo v surovém stavu a jako namleté plnivo [25]*

## **Příprava vzorků**

Do vybrané epoxidové pryskyřice se vmíchalo zvolené množství namletých rýžových slupek. Pryskyřice prosytila toto přírodní plnivo. Po prosycení plniva se přidalo adekvátní množství síťovacího činidla, které se označuje jako tvrdidlo. Množství tvrdidla se přidává v množství dané výrobcem. Na 10 g epoxidové pryskyřice se přidalo 1,2 ml tvrdidla.

Při přípravě se měnilo množství namletých rýžových slupek. Množství se udává v jednotce dsk. Jednotka dsk se používá v plastikářském průmyslu a její definice zní: jedná se o díl plniva na sto dílů kaučuku nebo polymeru obecně. Tato jednotka se dobře používá, protože nemusí docházet k přepočítávání hmotnostního podílu. Je to jednodušší v tom, že se všechno počítá na lopaty, popřípadě cisterny.

Pro odlití vzorků při přetlaku byly použity speciální rozebíratelné duralové formy. Vzorky byly vytvrzovány při přetlaku 0,7 MPa po dobu 24 hodin, poté byly z formy vyjmuty a dotvrzeny příslušnou dobu při atmosférickém tlaku a laboratorní teplotě 22 °C.

V následující tabulce (viz. tabulka č.9) je přehled použitých materiálů k experimentu. Dále je v tabulce uvedeno složení jednotlivých materiálů, počet vzorků a označení, kterými se budou jednotlivé materiály pro zjednodušení nadále označovat v předkládané diplomové práci.

Pro experiment bylo vybráno 12 materiálů o různém složení. Pro každý materiál bylo vyrobeno 5 vzorků s označením A, B, C, D, E. Hodnoty uvedené v tabulkách a grafech při realizaci experimentu jsou průměrné hodnoty z naměřených hodnot jednotlivých vzorků u každého materiálu. Naměřené hodnoty jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tabulkách v příloze.

*Tabulka 9 Použité vzorky pro experiment*

<b>Materiál</b>	<b>Označení</b>	<b>Složení</b>	<b>Počet vzorků</b>
ChS Epoxy 521 + P11 RH-A	1	Bez plniva	5
ChS Epoxy 521 + P11 RH-C	2	Bez plniva	5
ChS Epoxy 520 + 40 dsk uhlíková vlákna	3	40 dsk uhlíkových vláken	5
ChS Epoxy 520 + P11 455 - 0.0 - C - 200314	4	0 dsk plniva = bez plniva	5
ChS Epoxy 520 + P11 455 - 0.2 - C - 200314	5	0,2 dsk namletých rýžových slupek	5
ChS Epoxy 520 + P11 455 - 0.5 - C - 200314	6	0,5 dsk namletých rýžových slupek	5
ChS Epoxy 520 + P11 455 - 1.0 - C - 200314	7	1,0 dsk namletých rýžových slupek	5
ChS Epoxy 520 + P11 455 - 2.0 - C - 200314	8	2,0 dsk namletých rýžových slupek	5
ChS Epoxy 520 + P11 455 - 5.0 - C - 200314	9	5,0 dsk namletých rýžových slupek	5
ChS Epoxy 520 + P11 455 - 10.0 - C - 200314	10	10,0 dsk namletých rýžových slupek	5
ChS Epoxy 520 + P11 455 - 20.0 - C - 200314	11	20,0 dsk namletých rýžových slupek	5
ChS Epoxy 520 + P11 455 - 50.0 - C - 200314	12	50,0 dsk namletých rýžových slupek	5

### **Příprava zkušební vzorku pro experiment**

Pro upnutí vzorku na elektromagnetickou desku broušícího stroje bylo nutné přilepit materiál pomocí lepidla na ocelovou kostku (viz. obrázek č.11). Použilo se lepidlo Alteco 3-ton quick epoxy adhesive (viz. obrázek č.12). Jedná se o dvousložkové epoxidové lepidlo s kovovým plnidlem (tekutý kov). Používá se pro nejnáročnější opravy, lepení a lepicí svařování za studena.





Obrázek 11 Přilepený vzorek na ocelovou kostku



Obrázek 12 Dvousložkové lepidlo Altec 3-ton quick epoxy adhesive

Toto dvousložkové epoxidové lepidlo obsahuje ocelový prášek, má vyplňovací schopnosti, je tepelně vodivé, ale elektricky nevodivé. Dále umožňuje lepit a opravovat spoje s vysokou smykovou pevností minimálně  $130 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Tvrdost tohoto lepidla je 80 podle Shore-D a tepelná odolnost je po vytvrzení  $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 3.1.2 Metodika experimentu

V následujících tabulkách (viz. tabulka č.10 a č.11) jsou zpřehledněny základní parametry experimentu, resp. řezné podmínky, které byly použity při experimentu.

*Tabulka 10 Základní parametry experimentu*

Stroj	Bruska BPH 320 A
Nástroj	Brousicí kotouč A98 46 K 9V 001 250x25x76
Obráběné materiály	Kompozitní materiály na bázi reaktoplastu, konkrétně epoxidová pryskyřice
Experimentální prostředí	Obrábění za sucha
	Obrábění s procesní kapalinou Grinex 10
Měřené parametry	Drsnost povrchu
	Rozměrová přesnost
	Řezná síla
	Mikrotvrdost
	Teplota
	Součinitel teplotní roztažnosti
	Zanesení kotouče

*Tabulka 11 Řezné podmínky pro realizaci experimentu*

Parametr	Označení	Hodnota
Otáčky	$n \text{ [ot} \cdot \text{min}^{-1}]$	2655
Řezná rychlost	$v_c \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$	34,2
Počet přejezdů	-	14 (7 dvojzdvihů)

Broušení vzorků bylo realizováno ve dvou prostředích - broušení za sucha a broušení s procesní kapalinou. Jako procesní kapalina byla vybrána kapalina Grindex 10 od firmy Blaser Swissslube CZ, s.r.o. Jedná se o syntetickou mazací, chladicí a řeznou vodou mísitelnou kapalinu neobsahující minerální olej.

Procesní kapalina Grindex 10 se používá výhradně pro operaci broušení, kde uplatňuje dobrý vyplachující účinek a zároveň udržuje brousicí kotouč i stroj v čistotě. Při nízkých koncentracích má dobrou odolnost vůči korozi. Chladicí kapalina z nádoby k brousicímu kotouči byla přivedena pomocí čerpadla (viz. obrázek č.13), jehož průtok byl 0,27 litrů za sekundu.

*Tabulka 12 Technické parametry procesní kapaliny Grindex 10*

Technické parametry	Koncentrát	Roztok
Barva	Žlutá	-
Obsah minerálních olejů	0 %	-
Obsah vody	40 %	-
Hustota při 20 °C	1120 kg·m <sup>-3</sup>	-
PH hodnoty	-	8,7 - 9,2
Refraktometr faktor	-	3,1



*Obrázek 13 Čerpadlo pro přívod chladící kapaliny*

### 3.1.3 Popis stroje, nástroje a měřicích přístrojů

#### Obráběcí stroj

Broušení vzorků bylo realizováno na brusce BPH 320 A (viz. obrázek č.14), která je součástí strojního vybavení laboratoře Katedry obrábění a montáže, Fakultě strojní na Technické univerzitě v Liberci. Základní technické údaje brusky jsou uvedeny níže (viz. tabulka č.13).



Obrázek 14 Stroj bruska BPH 320 A

Tabulka 13 Základní technické údaje brusky BPH 320 A

Parametr	Hodnota	Jednotky
Upínací plocha stolu	320 x 1000	[mm]
Maximální délka broušení	1000	[mm]
Maximální výška broušeného předmětu	350	[mm]
Vzdálenost osy vřetena od plochy stolu	75 - 475	[mm]
Brousicí kotouč	250 x 320 x 76	[mm]
Průměr brousicího kotouče po opotřebení	130	[mm]
Hmotnost stroje se standardním vybavením	3345	[kg]
Podélný pohyb stolu	1060	[mm]
Otáčky brousicího kotouče Ø 250 mm	2522	[min <sup>-1</sup> ]
Otáčky brousicího kotouče Ø 189 mm	3319	[min <sup>-1</sup> ]
Celkový maximální příkon stroje	15,4	[kVA]

### Nástroj

Pro broušení vzorků byl použit plochý brousicí kotouč (viz. obrázek č.15) A98 46 K 9 V 001 s rozměry 250x25x76 [mm] (vnější průměr x šířka kotouče x průměr díry). Před realizací experimentu měl vnější průměr kotouče rozměr 246 mm.



*Obrázek 15 Brousicí kotouč pro realizaci experimentu [20]*

Brousicí kotouč má zrna z umělého korundu světle růžové barvy, která jsou do požadovaného tvaru spojena keramickým pojivem. Zrnitost kotouče má podle normy ČSN ISO 525 označení 46, což odpovídá velikosti zrn 315 až 400  $\mu\text{m}$ . Struktura kotouče má označení 9, což podle normy ČSN 22 4501 znamená velmi pórovitý brousicí kotouč. Nejčastěji se kotouč používá na broušení nerezů a ocele tvrdostí menší než 55 HRC.

Před každým měřením došlo k orovnění kotouče jednokamenovým diamantovým orovnávačem (viz. obrázek č.16). Tento typ orovnávače je vyroben z přírodního průmyslového diamantu, jehož kvalita a velikost neodpovídá požadavkům pro šperkařství a klenotnictví. Diamant je zasazen ve dvou třetinách ve stříbrné pájce, která zajišťuje dobrý odvod tepla při orovnění. Tento typ orovnávače nesnáší rázy a tepelné šoky při chlazení.



*Obrázek 16 Jednokamenový diamantový orovnávač*



Při orovnávání brousicího kotouče byl příčný posuv  $0,05 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . Nejprve došlo dvakrát k odebrání hloubky  $0,020 \text{ mm}$ , poté dvakrát  $0,010 \text{ mm}$  a  $0,005 \text{ mm}$  a na závěr jedenkrát bez přídavku.

### **Laboratorní profiloměr MITUTOYO**

Kvalita povrchu obrobeného materiálu byla měřena pomocí profiloměru Mitutoyo Surftest SV-2000N2 (viz. obrázek č.17).



*Obrázek 17 Laboratorní profiloměr MITUTOYO*

Profiloměr je schopen vypočítat velké množství parametrů drsnosti povrchu. Pro vyhodnocení byly zvoleny následující parametry:

- $R_a$  - průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu,
- $R_z$  - největší výška profilu,
- $R_t$  - celková výška profilu.

Snímač zaznamená po povrchu vzdálenost  $4,8 \text{ mm}$ . Z každé strany se  $0,4 \text{ mm}$  ořízne a vyhodnocení proběhne na dráze  $4 \text{ mm}$ . Hodnoty zvolených parametrů se vypočítají pomocí ovládacího softwaru Surfpak.

### **Digitální mikrometr MITUTOYO**

Pro měření rozměrové přesnosti byl použit digitální mikrometr od firmy Mitutoyo (viz. obrázek č.18) s rozsahem  $0-25 \text{ mm}$  a přesností  $0,001 \text{ mm}$ .



*Obrázek 18 Digitální mikrometr Mitutoyo*

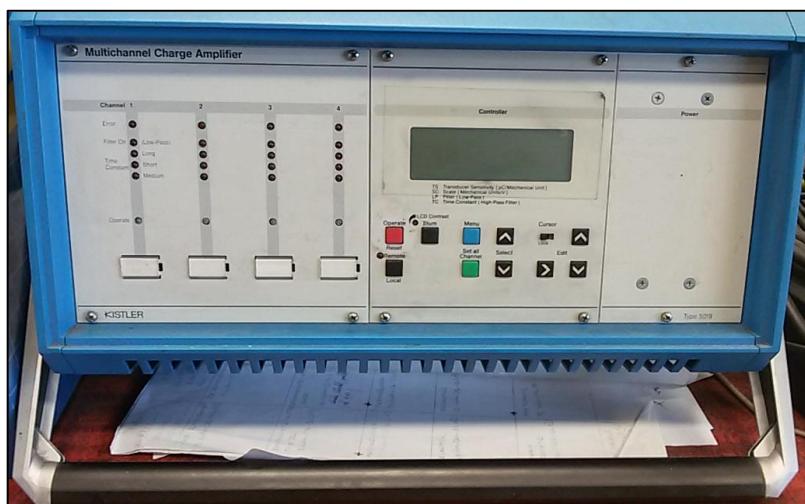
### **Piezoelektrický dynamometr KISTLER, typ 9265B**

Pro měření jednotkové smluvní kolmé řezné síly přímou metodou a maximální řezné síly byl použit piezoelektrický dynamometr KISTLER 9265 B (viz. obrázek č.19) s nábojovým zesilovačem 5019 B (viz. obrázek č.20). Tento dynamometr využívá pro snímání deformace piezoelektrického jevu, který je charakterizován vznikem elektrického náboje na povrchu některých krystalů při mechanickém zatížení. Velikost tohoto náboje je přímo úměrná velikosti působící síly a s poklesem zatížení se lineárně snižuje, až zcela vymizí při nulovém zatížení.



*Obrázek 19 Piezoelektrický dynamometr KISTLER 9265 B*

Dynamometr byl připnut na elektromagnetickou desku brusky. Na dynamometr byl umístěn elektromagnet, na který se upínaly brousicí vzorky. Elektromagnet byl k dynamometru uchycen pomocí dvou upínek.



*Obrázek 20 Nábojový zesilovač 5019 B*

Správná funkce dynamometru je závislá na dodržení těchto podmínek:

- teplota vzduchu  $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ,
- vlhkost vzduchu  $42\% \pm 5\%$ .

Dynamometr je velice citlivý na jakékoliv chvění či vibrace, dokonce i na procesní kapalinu. Proto se musel dynamometr ochránit před procesní kapalinou, která by způsobila nedůvěryhodné výsledky. Pro ochranu dynamometru se vyrobil kryt (viz. obrázek č.21) z papírové krabice omotaný izolepou. Tento kryt se použil i při měření řezných sil za sucha, aby experimenty probíhaly při stejných podmínkách.



*Obrázek 21 Ochrana dynamometru před procesní kapalinou*



## Teploměr METEX M 3890D

Pomocí teploměru byly měřeny dvě teploty - teplota v laboratoři a teplota vzorku ihned po broušení. Pro měření těchto dvou teplot byl použit digitální multimetr METEX M 3890D (viz. obrázek č.22).



*Obrázek 22 Digitální multimetr METEX M 3890D s připojením teplotní sondy*

Digitální multimetr METEX M 3890D měří stejnosměrná a střídavá napětí a proudy, odpory, kapacity, kmitočty a zesilovací činitel tranzistorů. Po doplnění teplotní sondou (viz. obrázek č.23) měří rovněž teplotu. Má automatické přepínání měřicích rozsahů a je vybaven funkcemi HOLD, MIN, MAX a OFFSET. Přístroj obsahuje paměť na 10 naměřených hodnot, rychlost měření je 2 měření za sekundu a pracovní teplota je v rozsahu 0-40 °C.



*Obrázek 23 Teplotní sonda pro měření teploty*

### Teploměr CEM DT-172

Pro měření teploty v rámci stanovení součinitele teplotní roztažnosti byl použit přístroj datalogger CEM DT-172 pro měření teploty a vlhkosti (viz. obrázek č.24). Jedná se o odolný a rychlý datalogger, jehož měřicí rozsah je  $-40$  až  $+70$  °C. U přístroje je možnost si nastavit volitelný měřicí cyklus v rozsahu 2 sekundy až 24 hodin. Přístroj obsahuje paměť až pro 32000 údajů.

Tento teploměr byl použit pro stanovení součinitele teplotní roztažnosti kompozitních vzorků. Nejprve se měřila teplota v laboratoři před měřením a následně teplota v mrazící komoře, kam byly vzorky umístěny na 24 hodin.



*Obrázek 24 Datalogger pro měření teploty a vlhkosti CEM DT-172*

### Tvrdoměr Micromet 2100 Series Microhardness Testers

Pro měření mikrotvrdosti vzorků byl použit tvrdoměr Micromet 2100 Series Microhardness Testers (viz. obrázek č.25) od firmy Buehler, který je součástí laboratorního vybavení Katedry materiálů, Fakulty strojní na Technické univerzitě v Liberci. Pomocí tohoto tvrdoměru lze vyhodnotit tvrdost dle Vickerse nebo Knoopu. Při realizaci experimentu byla mikrotvrdost měřena metodou dle Vickerse při zatížení 50 gramů po dobu 12 sekund.



Obrázek 25 Tvrdoměr Micromet 2100 Series Microhardness Testers

### **Ruční refraktometr Brix 0-18% ATC**

Pro zjištění správné koncentrace namíchané procesní kapaliny byl použit ruční refraktometr Brix 0 – 18% ATC (viz.obrázek č.26) s přesností  $\pm 0,15\%$ .

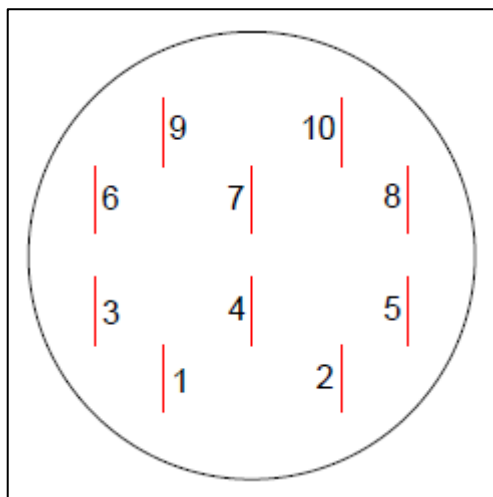


Obrázek 26 Ruční refraktometr

### 3.1.4 Měřené parametry

#### Drsnost povrchu

Na každém vzorku byla drsnost měřena v 10ti různých místech. (viz. obrázek č.27). Následně se vypočítal aritmetický průměr. Drsnost byla měřena kolmo na směr obrábění.



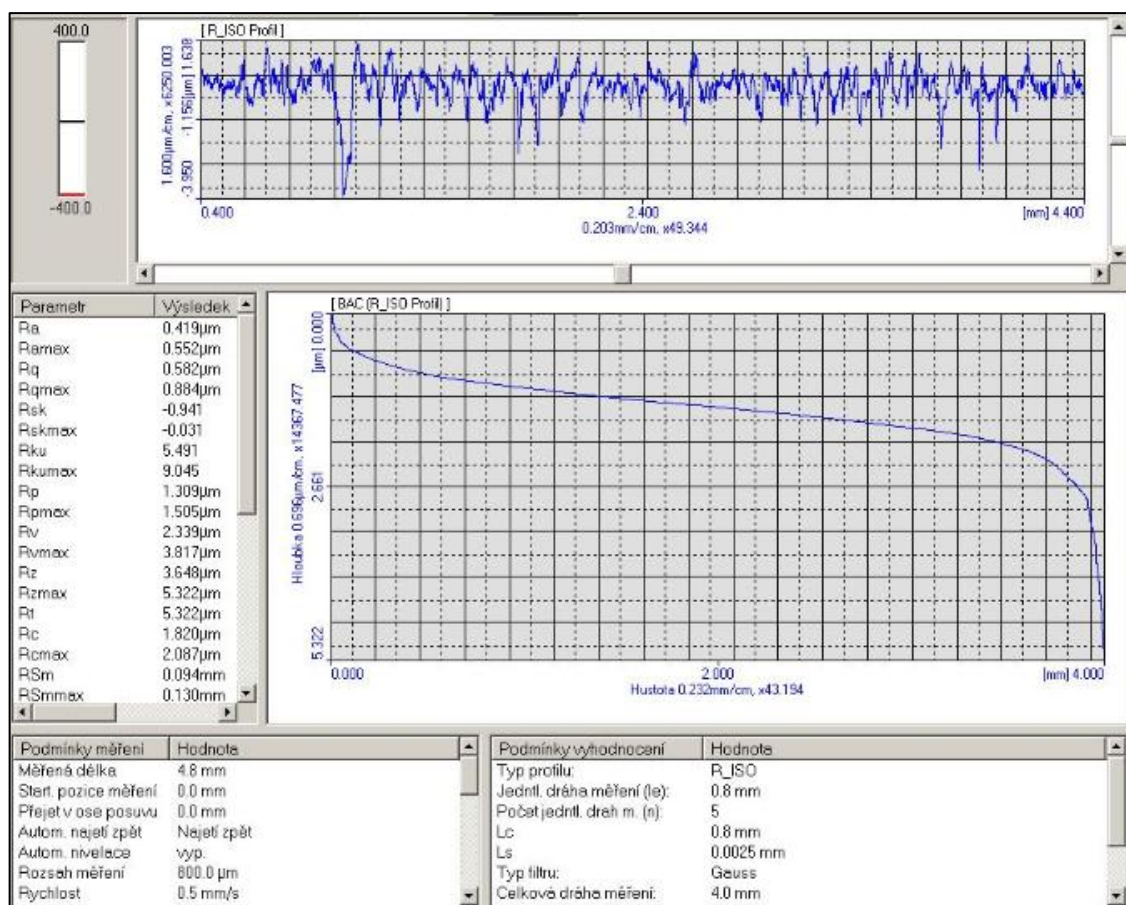
*Obrázek 27 Místa pro měření drsnosti povrchu*

Drsnost byla měřena pomocí profiloměru Mitutoyo Surftest SV–2000N2. Z velkého množství dat, které je profiloměr schopen vypočítat, byly pro vyhodnocení zvoleny následující parametry:

- $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ] - průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu,
- $R_z$  [ $\mu\text{m}$ ] - největší výška profilu,
- $R_t$  [ $\mu\text{m}$ ] - celková výška profilu.

Pro porovnání výsledných hodnot byl použit parametr drsnosti  $R_a$  (průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu), která je nejpoužívanější metodou pro hodnocení drsnosti povrchu v České republice. Drsnost materiálu se měřila po úběru 0,02 mm a také po celkovém úběru 1 mm, kde docházelo k hloubce záběru brousicího kotouče 0,1 mm. Zkoumalo se, zda velikost úběru bude mít vliv na drsnost povrchu. Snímač zaznamená po povrchu vzdálenost 4,8 mm, z každé strany se 0,4 mm ořízne a vyhodnocení proběhne na dráze 4 mm. Hodnoty zvolených parametrů se vypočítají pomocí ovládacího softwaru Surfpak. Vzorový výstup ze softwaru Surfpak je níže (viz. obrázek č.28).

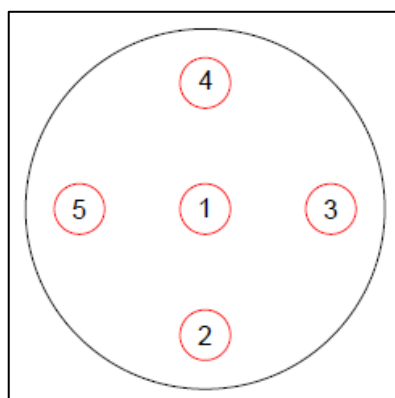




Obrázek 28 Vzorový výstup z programu Surfpak při technologii broušení

## Rozměrová přesnost

Rozměrová přesnost byla měřena ihned po broušení, 24 hodinách, týdnů, 4 týdnech a 6 týdnech po broušení s úběrem 0,02 mm. Následně se pro zajímavost měřila rozměrová přesnost i po broušení s celkovým úběrem 1 mm. U tohoto experimentu se rozměrová přesnost měřila ihned po broušení, 24 hodinách a týdnů po broušení. Na každém vzorku bylo změřeno 5 hodnot (viz. obrázek č.29), ze kterých se vypočetl aritmetický průměr.

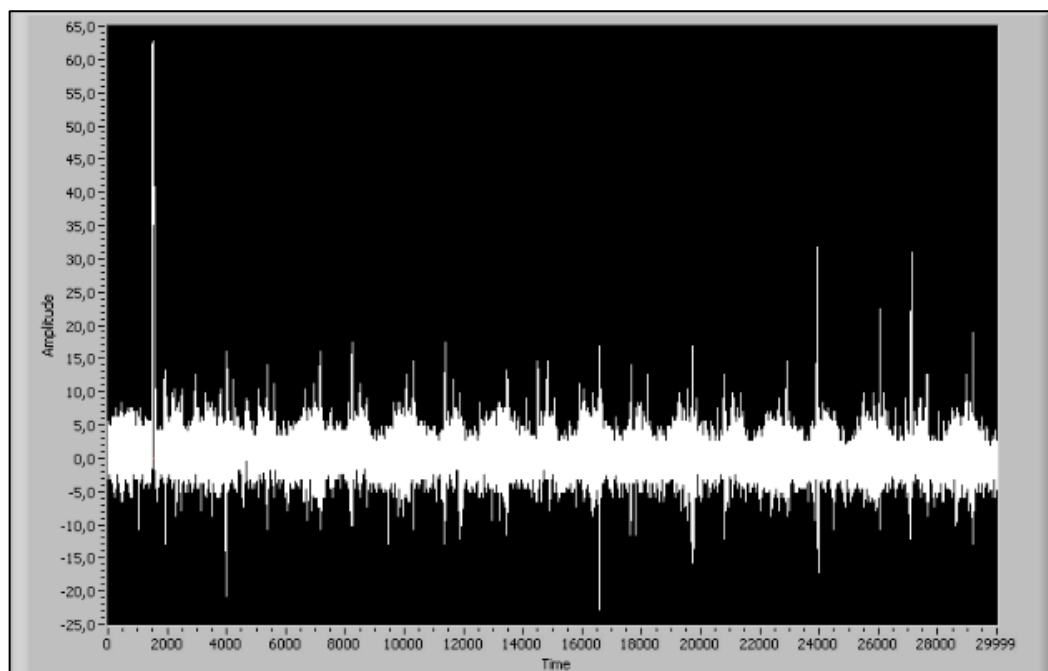


Obrázek 29 Místa pro měření rozměrové přesnosti

Pro měření rozměrové přesnosti byl použit digitální mikrometr od firmy Mitutoyo s rozsahem 0-25 mm a přesností 0,001 mm.

### Řezné síly

Velikost řezných sil byla měřena pomocí piezoelektrického dynamometru KISTLER 9265 B s nábojovým zesilovačem 5019 B. Pro vyhodnocení smluvní vyjiskřovací fáze broušení byl použit průběh kolmé řezné síly  $F_{CN}$ . Průběh měření je znázorněn níže (viz. obrázek č.30). Pro každé vyhodnocení bylo použito celkem 6 píků a z každého píku se měřila střední hodnota. Snahou je mít co nejstrmější exponencionální křivku. Z této křivky pak lze poznat, zda požadovanou hloubku záběru jsme schopni odebrat za co nejmenší počet zdvihů.

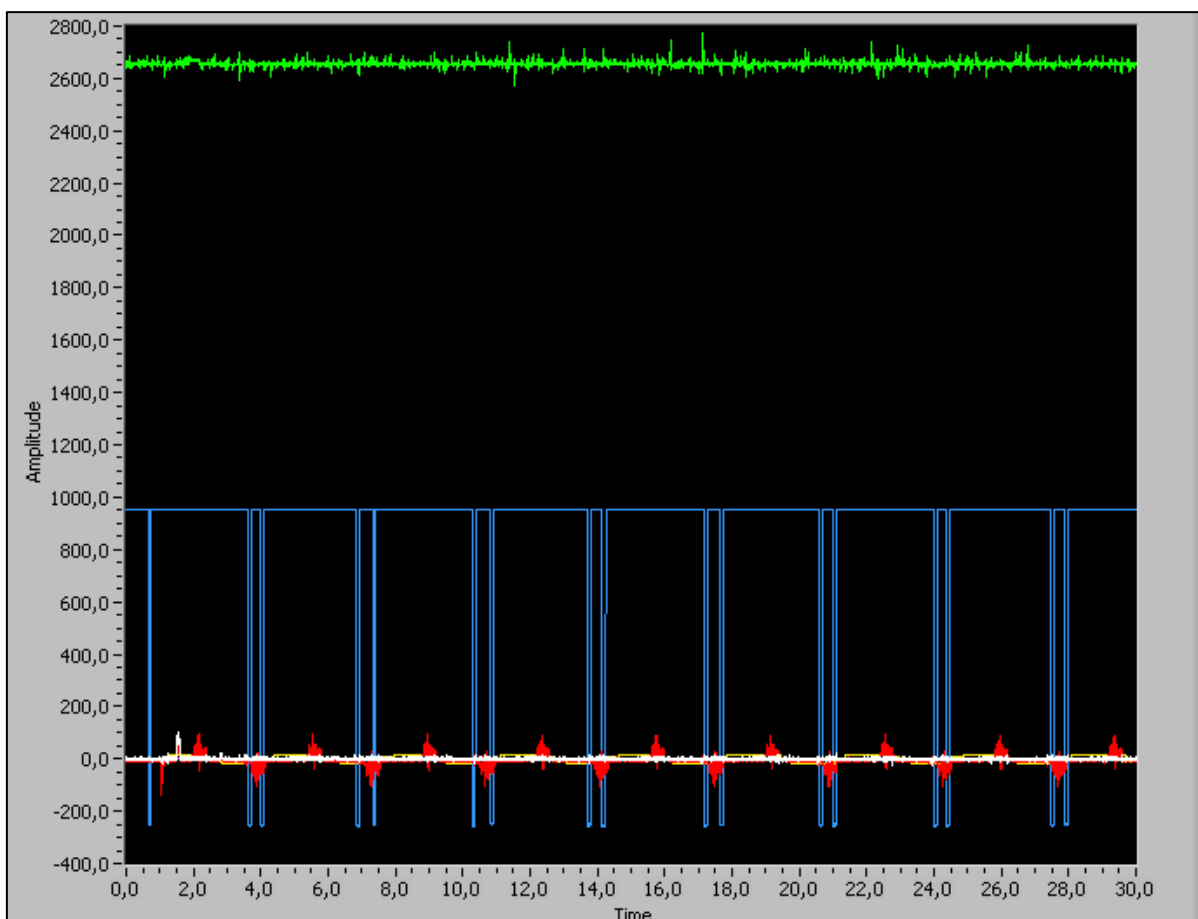


*Obrázek 30 Vzorový průběh kolmé síly při operaci broušení*

Smluvní hodnocení vyjiskřovací fáze broušení slouží pro rychlou orientaci. Dle grafu jsme schopni rychle určit, zda nám daný broušící kotouč nebo dané řezné podmínky vyhovují. Jednotková smluvní kolmá řezná síla je řezná síla vztažena na šířku obrobku 1 mm.

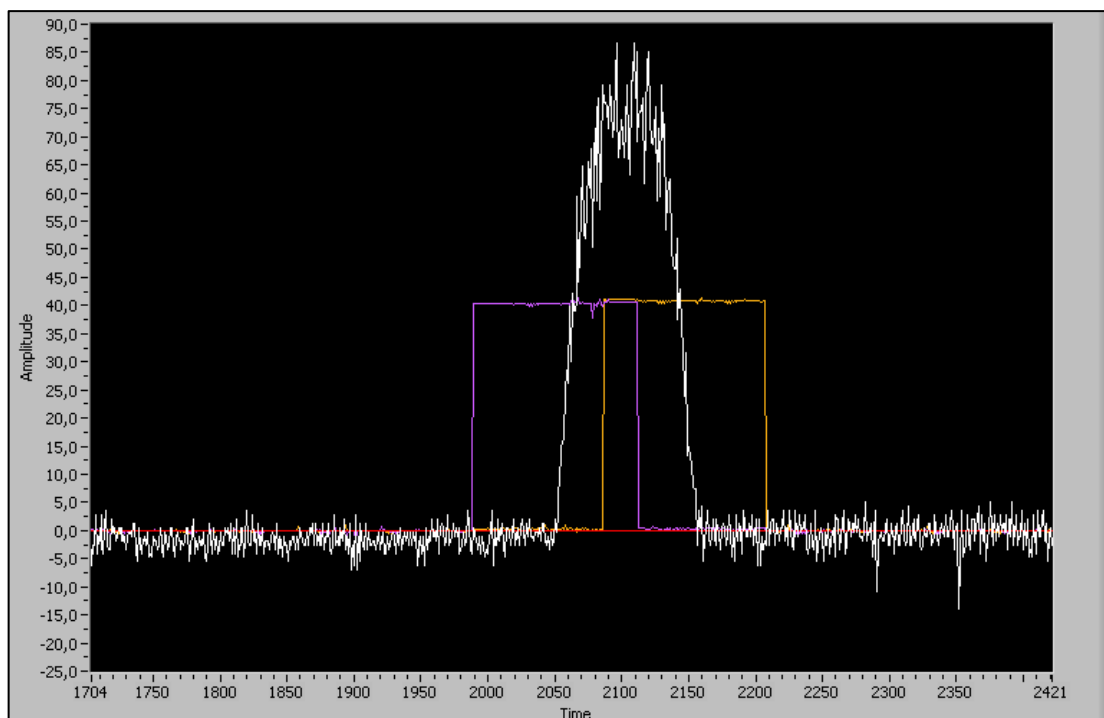
Dále byla měřena maximální řezná síla. Jedná se o sílu při prvním přejezdu kotouče, kdy dojde k úběru cca. 90 % hloubky záběru. Maximální řezná síla i smluvní řezná síla byla měřena při úběru materiálu 0,1 mm. U každého vzorku byla síla měřena desetkrát, ze které se následně vypočítal aritmetický průměr.

Na následujícím obrázku (viz. obrázek č.31) je znázorněn průběh, co vše je dynamometr schopen vyhodnotit. Zelenou barvou jsou znázorněny otáčky brousicího kotouče, bílou barvou je vyznačena radiální síla, červenou posuvová síla a žlutě rychlost stolu. Dynamometr je velmi citlivé zařízení, které zachytává veškeré chvění, a proto je každá křivka rozechvělá.



*Obrázek 31 Vzorový průběh všech parametrů při technologii broušení , které je dynamometr schopen vyhodnotit*

Na dalším obrázku (viz. obrázek č.32) je znázorněno, jak vyhodnocení smluvní řezné síly z jednotlivého píku probíhá. Pokud dochází k úběru materiálu, postupně se při přejezdu materiálu pod brousicím kotoučem sepnou snímače umístěny na vřetenu brusky. Fialovou barvou je sepnut snímač č.1 a žlutou barvou je sepnut snímač č.2. Pokud jsou oba snímače sepnuty, dojde k odečtení střední hodnoty kolmé řezné síly  $F_{CN}$ .

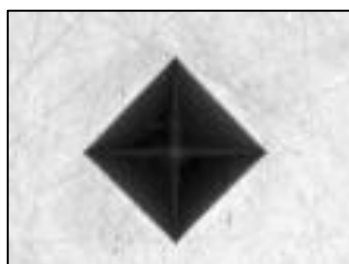


*Obrázek 32 Vzorový průběh vyhodnocení smluvní řezné síly z jednotlivého píku*

### **Mikrotvrdost**

Vyhodnocení mikrotvrdosti proběhlo podle Vickerse. Tvar indentoru pro měření podle Vickerse je rovnostranný jehlan s vrcholovým úhlem  $136^\circ$ . Hloubka vtisku vytvořená tímto indentorem odpovídá zhruba sedmině délky jeho úhlopříčky.

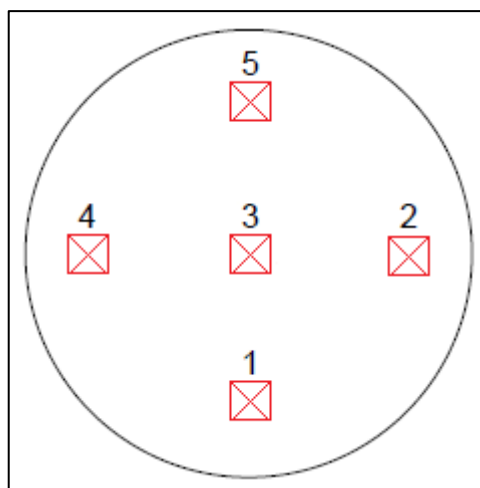
Při vytvoření vpichu v materiálu (viz. obrázek 33) došlo k odměření velikosti úhlopříček, které indentor vytvořil. Ze dvou úhlopříček se vypočítala průměrná hodnota a následně došlo k odečtení výsledné hodnoty tvrdosti podle Vickerse z tabulek.



*Obrázek 33 Vytvoření vpichu ve vzorku [21]*

Na každém vzorku proběhlo celkem 5 měření mikrotvrdosti na různých místech (viz. obrázek č.34), ze kterých se vypočítal aritmetický průměr. Mikrotvrdost materiálu byla měřena na přístroji Micromet 2100 Series Microhardness Testers od firmy Buehler.





*Obrázek 34 Místa pro měření tvrdosti podle Vickerse*

## **Teplota**

Při měření teploty se nejprve změřila teplota v laboratoři před broušením a následně byla měřena teplota vzorku po broušení, kdy došlo k úběru 0,1 mm při 14 přejezdech, respektive 7 dvoj zdvizích. Na každém vzorku byla teplota měřena desetkrát. Z naměřených hodnot se vypočítal aritmetický průměr. Dále byl vypočítán rozdíl teplot a zjišťovalo se, u jakého vzorku došlo k největšímu zahřátí nebo ochlazení během broušení. Pro měření teploty byl použit digitální multimetr METEX M 3890D doplněn o teplotní sondu.

## **Součinitel teplotní roztažnosti**

Pro měření součinitele tepelné roztažnosti byl použit digitální úchylkoměr ABSOLUTE DIGIMATIC ID-S od firmy Mitutoyo (viz. obrázek 35). Snímač ABSOLUTE zaručuje, že se nemusí nastavovat počátek po každém zapnutí přístroje.

Digitální úchylkoměr má následující parametry:

- rozsah měření: 12,7 mm,
- rozlišení: 0,001 mm,
- přesnost: 0,003 mm,
- výstup dat: ano.



*Obrázek 35 Digitální úchylkoměr ABSOLUTE DIGIMATIC ID-S*

Digitální úchylkoměr byl ustaven do stojánu (viz. obrázek číslo 36). Tepelná roztažnost vzorků byla měřena na dvou místech - po obvodu vzorku (na výšku) a na tloušťce (šířce) vzorku (viz. obrázek 37.1 a 37.2).



*Obrázek 36 Ustavení digitálního úchylkoměru do stojánu*



Obrázek 37.1 Měření odchylky  
po obvodu vzorku



Obrázek 37.2 Měření odchylky  
na tloušťce vzorku

Nejprve se změřil rozměr vzorku pomocí digitálního mikrometru od firmy Mitutoyo s přesností 0,001 mm. Vzorek se umístil pod digitální úchylkoměr, kde došlo k vynulování úchylkoměru. Poté se vzorek umístil do mrazící komory, kde byla nastavena teplota na -20 °C. Po 24 hodinách se vzorek z mrazící komory vytáhl a ihned se změřilo na digitálním úchylkoměru, k jaké odchylce rozměru došlo. Podle vzorce číslo 2 se změřil součinitel teplotní roztažnosti  $\alpha \left[ \frac{\mu\text{m}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$ .

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_1} \cdot \Delta t = \frac{l_1 - l_2}{l_1} \cdot (t_2 - t_1), \quad (2)$$

kde:	$\Delta l$	[m]	změřená změna - odchylka,
	$\Delta t$	[°C]	změna teploty,
	$l_1$	[m]	rozměr před změnou teploty,
	$l_2$	[m]	rozměr po změně teploty,
	$t_1$	[°C]	teplota v laboratoři,
	$t_2$	[°C]	teplota v mrazáku.

Tepelná roztažnost se měřila při změně teploty z teploty laboratoře na teplotu  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pomocí vzorce číslo 2 se pomocí vypočítaného součinitele tepelné roztažnosti vypočítala odchylka pro jiné teploty - horní teplotní mez ( $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a dolní teplotní mez ( $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

### **Zanesení kotouče**

Po měření řezných sil, kde došlo postupným úběrem  $0,1\text{ mm}$  až k celkovému úběru  $1\text{ mm}$ , se vždy porovnávalo zanesení kotouče pro různé materiály.

## **3.2 Realizace experimentu**

Tato kapitola se zabývá vyhodnocením výsledků dosažených během realizace experimentu, jejich analýzou a hodnocením. V rámci experimentu se měřila drsnost povrchu, rozměrová přesnost, řezná síla, mikrotvrdomost, teplota vzorku během broušení, součinitel teplotní roztažnosti a zanesení kotouče. U každého měřeného parametru jsou tabulky a grafy naměřených hodnot, které byly zpracovány pomocí programu Microsoft Excel. V každé tabulce je zeleně vyznačena hodnota měřeného parametru, která dopadla nejlépe a červeně hodnota, která dopadla nejhůře. Na konci každého měřeného parametru je vyhodnocení výsledků dosažených během měření.

### **3.2.1 Drsnost povrchu**

Pro měření drsnosti povrchu byl použit přístroj podle metodiky uvedené v kapitole 3.1.3. Drsnost povrchu materiálů se měřila po úběru  $0,02\text{ mm}$  a po úběrech  $0,1\text{ mm}$  až do celkového úběru  $1\text{ mm}$ . Zjišťovalo se, zda velikost úběru bude mít vliv na drsnost povrchu. Na každém vzorku proběhlo celkem 10 měření drsnosti povrchu pro minimalizaci odchylek. Následně byla vypočtena aritmetická hodnota. Pro hodnocení experimentu byly zvoleny následující parametry:

- $R_a$  - průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu,
- $R_z$  - největší výška profilu,
- $R_t$  - celková výška profilu.

Pro porovnání výsledných hodnot byl použit parametr drsnosti Ra (průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu), který je v České republice vžitý, přehledný a v praxi ověřený. Snímač zaznamená po povrchu vzdálenost 4,8 mm, z každé strany se 0,4 mm ořízne a vyhodnocování proběhne na dráze 4 mm. Dosažené výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulkách č.14, 15, 16 a 17 a zřehledněny v grafech č.1 a 2. Data byla zpracována do tabulek a grafu v programu Microsoft Excel. V příloze 1 jsou uvedeny drsnosti pro jednotlivé vzorky.

### Drsnost povrchu při úběru 0,02 mm

Tabulka 14 Drsnost povrchu při broušení za sucha - úběr 0,02 mm

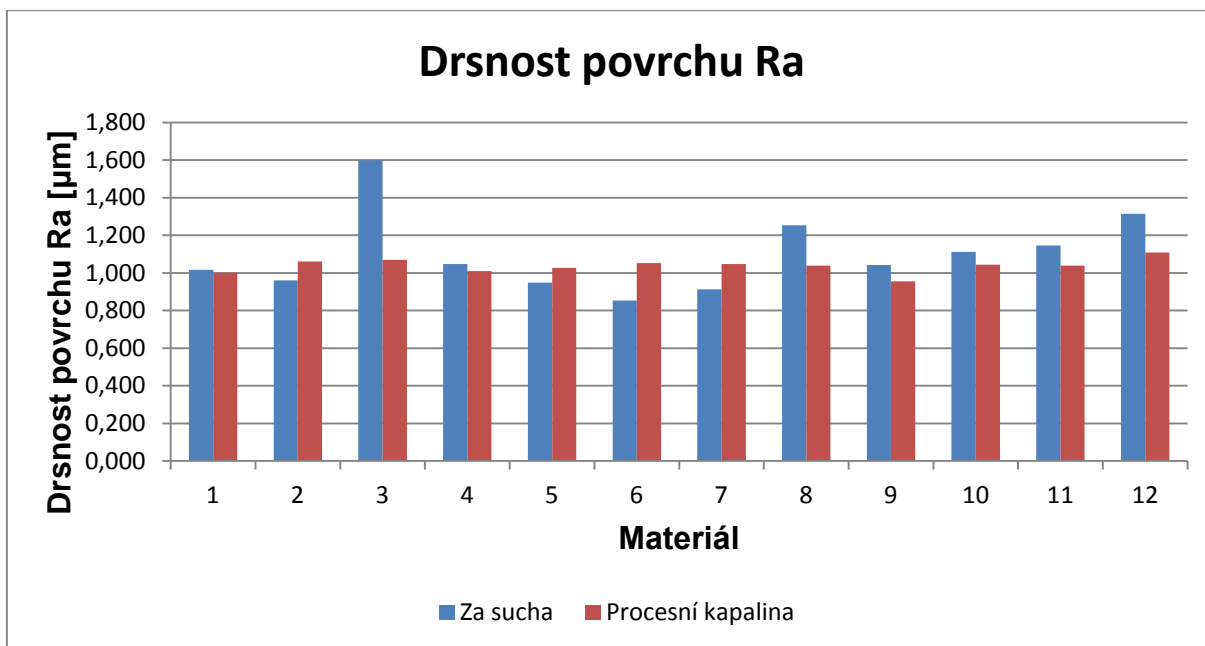
Drsnost povrchu - za sucha, úběr 0,02 mm			
Materiál	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rt [ $\mu\text{m}$ ]
1	$1,016 \pm 0,017$	$6,990 \pm 0,081$	$9,806 \pm 0,096$
2	$0,961 \pm 0,034$	$6,367 \pm 0,318$	$10,192 \pm 0,758$
3	$1,599 \pm 0,076$	$11,036 \pm 1,021$	$18,643 \pm 2,267$
4	$1,047 \pm 0,009$	$6,164 \pm 0,158$	$7,409 \pm 0,172$
5	$0,949 \pm 0,035$	$6,604 \pm 0,126$	$9,854 \pm 0,208$
6	$0,853 \pm 0,045$	$5,865 \pm 0,237$	$8,309 \pm 0,577$
7	$0,912 \pm 0,022$	$5,859 \pm 0,162$	$8,006 \pm 0,311$
8	$1,253 \pm 0,058$	$8,431 \pm 0,202$	$13,176 \pm 0,579$
9	$1,042 \pm 0,016$	$6,749 \pm 0,217$	$9,368 \pm 0,552$
10	$1,112 \pm 0,049$	$7,577 \pm 0,142$	$11,005 \pm 0,630$
11	$1,146 \pm 0,027$	$8,515 \pm 0,084$	$16,970 \pm 0,760$
12	$1,314 \pm 0,117$	$10,941 \pm 1,397$	$20,775 \pm 2,653$

Z tabulky č.14 je zřejmé, že nejnižší (nejlepší) hodnoty drsnosti povrchu při broušení bez procesní kapaliny a úběru 0,02 mm se dosáhlo u materiálu 6 (0,5 dsk namletých rýžových slupek). Důvodem nízké hodnoty drsnosti je malé množství plni-  
va (rýžových slupek) a malá hloubka záběru. Naopak největší (nejhorší) hodnoty byly naměřeny u materiálu 3 (40 dsk uhlíkových vláken). To je zapříčiněno plnivem z uhlí-  
kových vláken, která jsou velmi abrazivní (abraze = mechanické obrušování povrchu) a tím zvyšují (zhoršují) drsnost povrchu.

Tabulka 15 Drsnost povrchu při broušení s procesní kapalinou - úběr 0,02 mm

Drsnost povrchu - procesní kapalinou, úběr 0,02 mm			
Materiál	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rt [ $\mu\text{m}$ ]
1	1,001 $\pm$ 0,034	5,779 $\pm$ 0,241	7,345 $\pm$ 0,156
2	1,060 $\pm$ 0,033	6,520 $\pm$ 0,069	8,468 $\pm$ 0,096
3	1,069 $\pm$ 0,083	7,817 $\pm$ 0,898	13,197 $\pm$ 2,439
4	1,010 $\pm$ 0,043	6,094 $\pm$ 0,077	7,665 $\pm$ 0,334
5	1,027 $\pm$ 0,037	6,468 $\pm$ 0,410	8,542 $\pm$ 0,457
6	1,053 $\pm$ 0,040	6,361 $\pm$ 0,203	8,107 $\pm$ 0,287
7	1,048 $\pm$ 0,022	6,546 $\pm$ 0,360	8,260 $\pm$ 0,242
8	1,038 $\pm$ 0,057	6,408 $\pm$ 0,329	8,421 $\pm$ 0,548
9	0,955 $\pm$ 0,039	6,038 $\pm$ 0,136	7,598 $\pm$ 0,189
10	1,043 $\pm$ 0,045	6,284 $\pm$ 0,217	8,593 $\pm$ 1,043
11	1,038 $\pm$ 0,058	7,011 $\pm$ 0,554	11,577 $\pm$ 2,375
12	1,109 $\pm$ 0,155	7,690 $\pm$ 1,119	12,332 $\pm$ 2,634

Z tabulky č.15 lze stanovit, že nejmenších (nejlepších) hodnot drsnosti povrchu po broušení s procesní kapalinou při úběru 0,02 mm se dosáhlo u materiálu 9 (5,0 dsk namletých rýžových slupek). Příčinou je menší množství plniva (namletých rýžových slupek). Naopak nejhorší (největší) drsnost povrchu se naměřila u materiálu 12 (50,0 dsk namletých rýžových slupek). Důvodem je velké množství (největší množství ze všech použitých materiálů) plniva (namletých rýžových slupek), které způsobí abrazivitu povrchu a tím dochází ke zvýšení (zhoršení) drsnosti.



Graf 1 Porovnání drsnosti povrchu po broušení - úběr 0,02 mm

### Drsnost povrchu při úběru 1 mm

Tabulka 16 Drsnost povrchu při broušení za sucha - úběr 1 mm

Drsnost povrchu - za sucha, úběr 1 mm			
Materiál	Ra [μm]	Rz [μm]	Rt [μm]
1	0,565 ± 0,028	4,247 ± 0,135	6,714 ± 0,312
2	1,038 ± 0,032	6,290 ± 0,161	9,449 ± 0,316
3	0,680 ± 0,036	6,232 ± 0,126	11,038 ± 1,163
4	0,657 ± 0,029	5,364 ± 0,215	9,109 ± 0,231
5	0,805 ± 0,029	5,233 ± 0,187	7,726 ± 0,293
6	0,881 ± 0,020	6,551 ± 0,146	12,120 ± 1,798
7	0,851 ± 0,016	5,579 ± 0,181	7,939 ± 0,390
8	0,668 ± 0,025	5,125 ± 0,196	11,120 ± 1,366
9	0,551 ± 0,022	5,054 ± 0,121	9,390 ± 0,136
10	0,827 ± 0,046	6,943 ± 0,232	16,402 ± 1,127
11	0,770 ± 0,023	6,205 ± 0,115	11,826 ± 0,839
12	1,136 ± 0,034	9,850 ± 0,211	18,620 ± 2,283

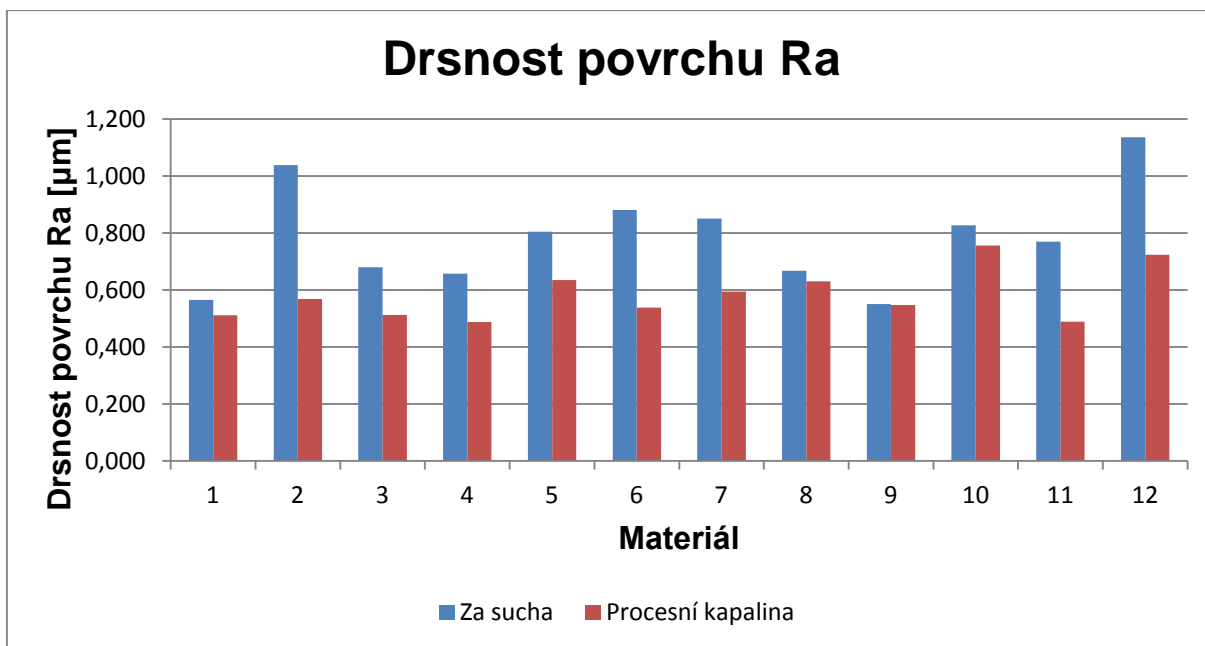
Z tabulky č.16 je patrné, že při broušení za sucha a celkovém úběru 1 mm se vlivem většího zanesení broušícího kotouče dosáhne menší (lepší) drsnosti povrchu než při broušení za sucha a úběru 0,02 mm. Nejlepší (nejmenší) drsnosti povrchu se dosáhlo u materiálu 9 (5,0 dsk namletých rýžových slupek). Nejnižších hodnot drsnosti se dosáhlo vlivem menšího množství plniva (namletých rýžových slupek). Naopak nejhorších (největších) hodnot se dosáhlo u materiálu 12 (50,0 dsk namletých rýžových slupek). Vysvětlením je velké množství plniva (namletých rýžových slupek), které způsobí abrazivitu povrchu a tím zhoršují (zvyšují) drsnost.

*Tabulka 17 Drsnost povrchu při broušení s procesní kapalinou - úběr 1 mm*

<b>Drsnost povrchu - procesní kapalinou, úběr 1 mm</b>			
<b>Materiál</b>	<b>Ra [<math>\mu</math>m]</b>	<b>Rz [<math>\mu</math>m]</b>	<b>Rt [<math>\mu</math>m]</b>
1	0,512 $\pm$ 0,015	4,034 $\pm$ 0,149	6,839 $\pm$ 0,269
2	0,569 $\pm$ 0,036	5,384 $\pm$ 0,092	11,407 $\pm$ 1,172
3	0,513 $\pm$ 0,027	4,849 $\pm$ 0,087	9,552 $\pm$ 0,974
4	0,488 $\pm$ 0,019	4,859 $\pm$ 0,185	8,279 $\pm$ 0,213
5	0,635 $\pm$ 0,035	5,819 $\pm$ 0,137	11,273 $\pm$ 1,147
6	0,538 $\pm$ 0,022	3,917 $\pm$ 0,170	6,063 $\pm$ 0,128
7	0,595 $\pm$ 0,019	5,471 $\pm$ 0,135	9,651 $\pm$ 0,699
8	0,630 $\pm$ 0,020	5,645 $\pm$ 0,148	9,878 $\pm$ 0,559
9	0,547 $\pm$ 0,028	5,253 $\pm$ 0,213	9,255 $\pm$ 0,982
10	0,756 $\pm$ 0,028	7,387 $\pm$ 0,133	13,002 $\pm$ 1,072
11	0,489 $\pm$ 0,018	4,722 $\pm$ 0,331	8,222 $\pm$ 0,457
12	0,724 $\pm$ 0,014	4,834 $\pm$ 0,171	6,425 $\pm$ 0,446

Z tabulky č.17 je zřejmé, že při broušení s procesní kapalinou a úběru 1 mm se vlivem delší doby použití procesní kapaliny dosáhne lepší (menší) drsnosti povrchu. Vysvětlením je větší mazací účinek od procesní kapaliny. Nejlepších (nejmenších) hodnot se dosáhlo u materiálu 4 (0,2 dsk namletých rýžových slupek). Příčinou je opět malé množství plniva (namletých rýžových slupek). Naopak nejhorších (nejvyšších) výsledků se dosáhlo u materiálu 10 (10,0 dsk namletých rýžových slupek). Znovu je důvodem větší množství plniva (namletých rýžových slupek). Dochází k větší abrazivitě povrchu a tím se zhoršuje (zvyšuje) drsnost povrchu.





*Graf 2 Porovnání drsnosti povrchu pro broušení - úběr 1 mm*

Z grafů č. 1, 2 a tabulek č.14 až 17 lze stanovit následující:

- Větší zanesení brousícího kotouče zlepší drsnost povrchu (zrna kotouče nejsou vlivem zanesení tolik vystouplá a dochází k lepšímu vyhlazení povrchu).
- Při použití delší doby procesní kapaliny má kapalina větší mazací účinek, čímž se dosáhne lepší drsnosti povrchu.
- Čím větší podíl plniva (uhlíková vlákna, namleté rýžové slupky), tím větší abrazivita povrchu a tím vyšší (horší) hodnota drsnosti.

### 3.2.2 Rozměrová přesnost

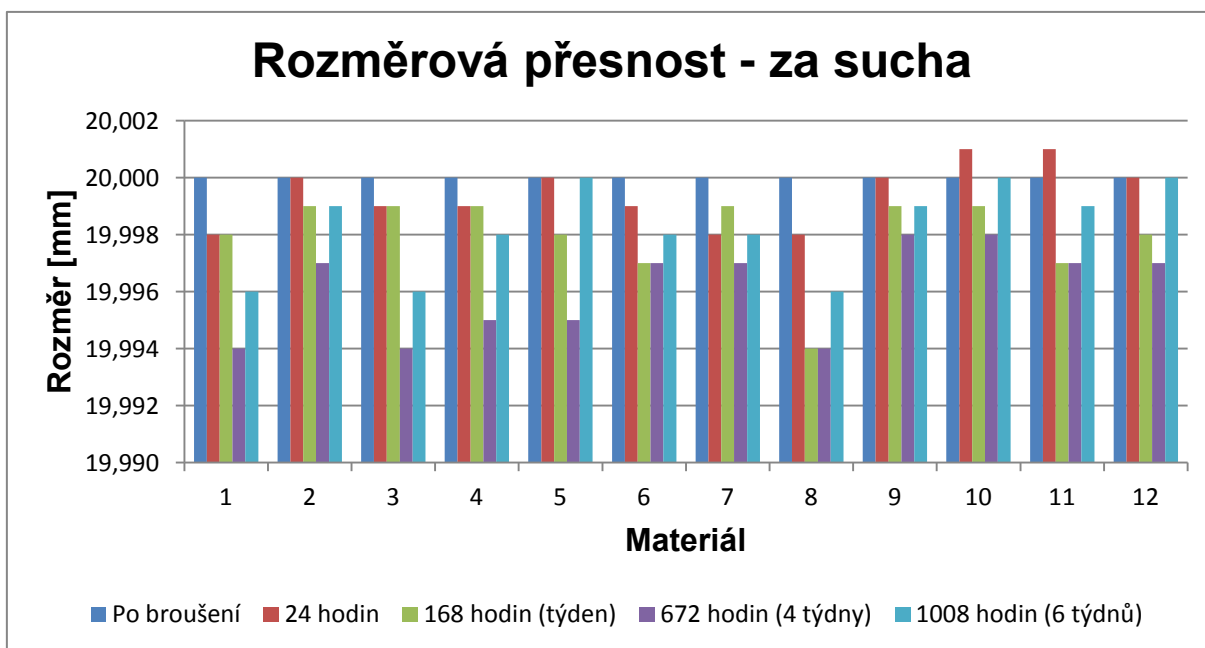
Pro měření rozměrové přesnosti byl použit přístroj podle metodiky uvedené v kapitole 3.1.3. Rozměrová přesnost byla měřena po broušení s úběrem 0,02 mm šestkrát po různých časových intervalech, aby se zjistila rozměrová stabilita materiálu po broušení. Rozměrová přesnost byla tedy měřena ihned po broušení, 24 hodinách, týdnu, 4 týdnech a 6 týdnech po broušení. Následně se měřila rozměrová přesnost po broušení s celkovým úběrem 1 mm a porovnávalo se, zda hloubka záběru má vliv na rozměrovou přesnost materiálů. U tohoto experimentu se rozměrová přesnost po broušení měřila ihned po broušení, 24 hodinách a týdnu po broušení. Na každém vzorku proběhlo 5 měření na různých místech pro minimalizaci chyb a následně se

vypočítal aritmetický průměr. V příloze 2 jsou uvedeny rozměrové přesnosti pro jednotlivé vzorky.

### Rozměrová přesnost s úběrem 0,02 mm

Tabulka 18 Rozměrová přesnost po broušení za sucha - úběr 0,02 mm

Rozměrová přesnost - za sucha, úběr 0,02 mm					
Vzorek	Po broušení [mm]	24 hodin [mm]	168 hodin (týden) [mm]	672 hodin (4 týdny) [mm]	1008 hodin (6 týdnů) [mm]
1	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,994 ± 0,001	19,996 ± 0,001
2	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,001	19,997 ± 0,001	19,999 ± 0,000
3	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,999 ± 0,001	19,994 ± 0,001	19,996 ± 0,000
4	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,995 ± 0,000	19,998 ± 0,000
5	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,995 ± 0,000	20,000 ± 0,001
6	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,997 ± 0,001	19,997 ± 0,001	19,998 ± 0,000
7	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,997 ± 0,000	19,998 ± 0,000
8	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,994 ± 0,001	19,994 ± 0,001	19,996 ± 0,000
9	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,999 ± 0,000
10	20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,001	19,999 ± 0,000	19,998 ± 0,000	20,000 ± 0,000
11	20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,000	19,997 ± 0,000	19,997 ± 0,001	19,999 ± 0,000
12	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,997 ± 0,000	20,000 ± 0,001



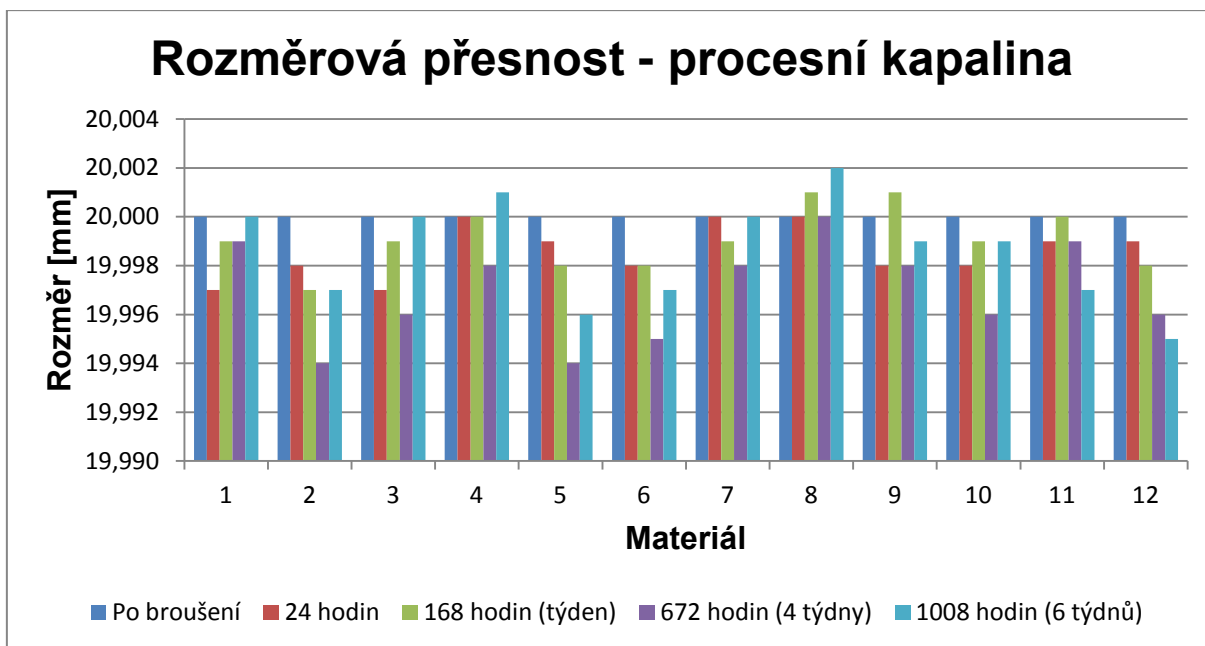
Graf 3 Porovnání rozměrové přesnosti při broušení za sucha - úběr 0,02 mm

Z tabulky č.18 a grafu č.3 lze stanovit, že při broušení bez procesní kapaliny a úběru 0,02 mm dochází u materiálů postupem času (dní i týdnů) k poklesu rozměru. Při broušení vzniká teplo mezi nástrojem a materiálem. Kompozitní materiály mají oproti kovům vyšší teplotní roztažnost, čímž způsobují smrštění materiálů. Po 6 týdnech naopak začal rozměr materiálů opět nabývat. Materiál po broušení fyzicky pracuje, ale postupem času (dní, týdnů) stabilizuje svůj rozměr.

Největší rozměrové stability se dosáhlo u materiálů s větším množstvím plniva, která snižují teplotní roztažnost materiálů. Nejlepší rozměrové stability dosáhl materiál 10 (10,0 dsk namletých rýžových slupek). Naopak nejmenší rozměrové stability se dosáhlo u materiálů, která obsahují málo plniva nebo žádné plnivo. Nejhůře dopadl materiál 8 (2,0 dsk namletých rýžových slupek).

*Tabulka 19 Rozměrová přesnost po broušení s použitím  
procesní kapaliny - úběr 0,02 mm*

Rozměrová přesnost - procesní kapalina, úběr 0,02 mm					
Vzorek	Po broušení [mm]	24 hodin [mm]	168 hodin (týden) [mm]	672 hodin (4 týdny) [mm]	1008 hodin (6 týdnů) [mm]
1	20,000 ± 0,000	19,997 ± 0,001	19,999 ± 0,000	19,999 ± 0,001	20,000 ± 0,001
2	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001	19,997 ± 0,001	19,994 ± 0,001	19,997 ± 0,001
3	20,000 ± 0,000	19,997 ± 0,001	19,999 ± 0,001	19,996 ± 0,001	20,000 ± 0,000
4	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,000	20,001 ± 0,000
5	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,998 ± 0,001	19,994 ± 0,001	19,996 ± 0,000
6	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,995 ± 0,001	19,997 ± 0,000
7	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,998 ± 0,001	20,000 ± 0,000
8	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,001	20,000 ± 0,000	20,002 ± 0,001
9	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001	20,001 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,999 ± 0,000
10	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,996 ± 0,001	19,999 ± 0,001
11	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,997 ± 0,000
12	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,001	19,998 ± 0,000	19,996 ± 0,000	19,995 ± 0,000



*Graf 4 Porovnání rozměrové přesnosti při broušení  
s procesní kapalinou - úběr 0,02 mm*

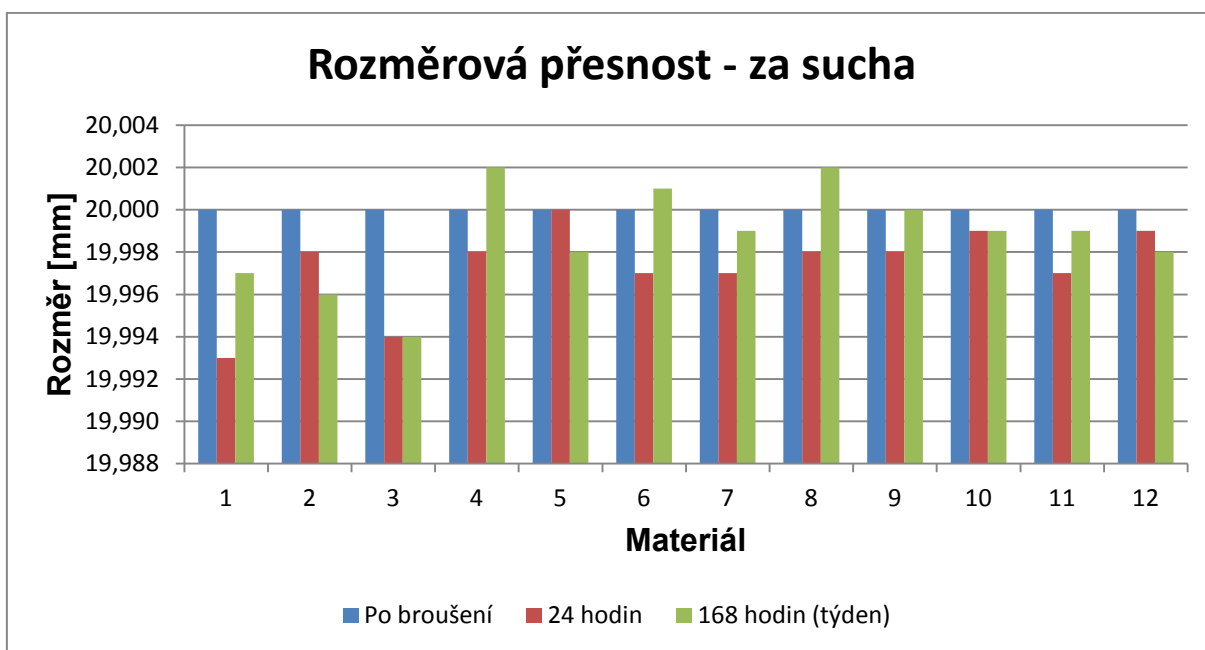
Při broušení s procesní kapalinou a úběru 0,02 mm nevznikají při broušení vysoké teploty mezi nástrojem a materiálem, tím se zmenšuje teplotní roztažnost materiálů a dochází k lepší rozměrové stabilitě. Proto nelze jednoznačně určit, zda při broušení s procesní kapalinou má množství rýžových slupek vliv na rozměrovou přesnost. Ovšem i zde platí, že největšího smrštění se dosáhlo po 4 týdnech, naopak po 6 týdnech začal materiál opět nabývat na rozměru.

### Rozměrová přesnost s úběrem 1 mm

*Tabulka 20 Rozměrová přesnost po broušení za sucha - úběr 1 mm*

Rozměrová přesnost - za sucha, úběr 1 mm			
Vzorek	Po broušení [mm]	24 hodin [mm]	168 hodin (týden) [mm]
1	20,000 ± 0,000	19,993 ± 0,000	19,997 ± 0,000
2	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001	19,996 ± 0,001
3	20,000 ± 0,000	19,994 ± 0,001	19,994 ± 0,001
4	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	20,002 ± 0,000
5	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001
6	20,000 ± 0,000	19,997 ± 0,001	20,001 ± 0,001

Vzorek	Po broušení [mm]	24 hodin [mm]	168 hodin (týden) [mm]
7	20,000 ± 0,000	19,997 ± 0,000	19,999 ± 0,000
8	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001	20,002 ± 0,000
9	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	20,000 ± 0,000
10	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,999 ± 0,000
11	20,000 ± 0,000	19,997 ± 0,001	19,999 ± 0,001
12	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,998 ± 0,000

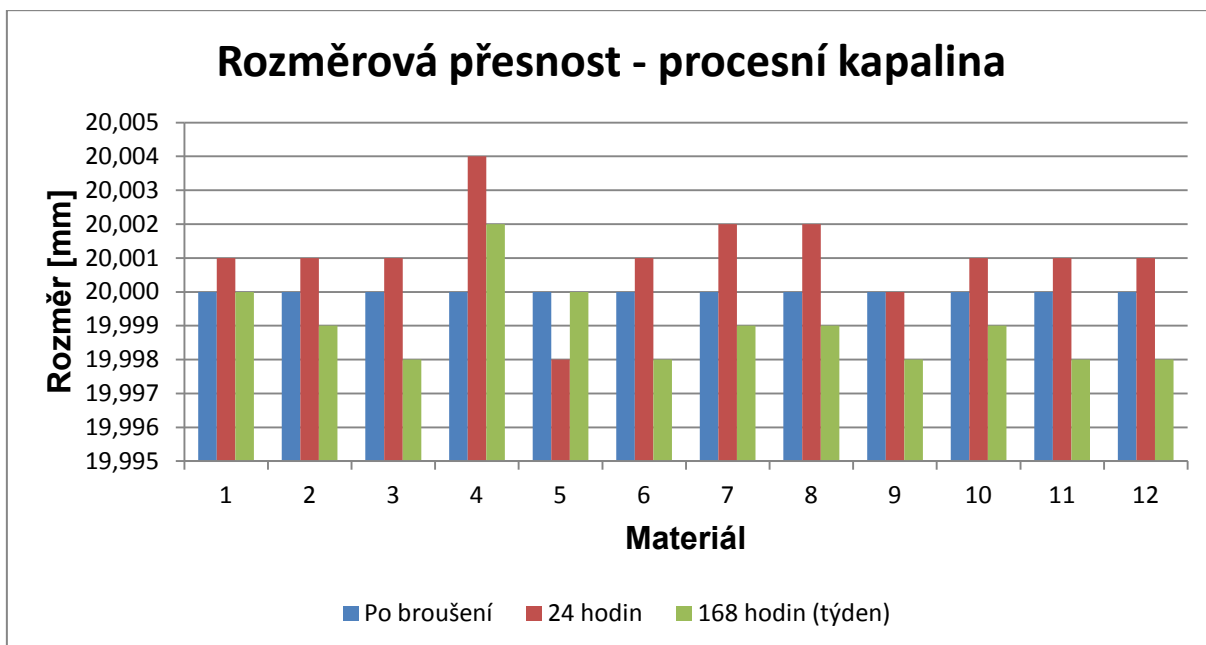


*Graf 5 Porovnání rozměrové přesnosti při broušení za sucha - úběr 1 mm*

Z tabulky č.20 a grafu č.5 je zřejmé, že při broušení bez procesní kapaliny a celkovém úběru 1 mm se nejhorších výsledků dosáhlo u materiálu 3 (40,0 dsk uhlíková vlákna). Příčinou je velké zahřátí materiálu během broušení, materiál fyzicky pracuje a postupem dní se smršťuje. Naopak nejlepších hodnot se dosáhlo u materiálů, která obsahuje větší množství plniva. Patří mezi ně materiály 9 (5,0 dsk namletých rýžových slupek), 10 (10,0 dsk namletých rýžových slupek) a 11 (20,0 dsk namletých rýžových slupek).

Tabulka 21 Rozměrová přesnost po broušení s použitím  
procesní kapaliny - úběr 1 mm

Rozměrová přesnost - procesní kapalinou, úběr 1 mm			
Vzorek	Po broušení [mm]	24 hodin [mm]	168 hodin (týden) [mm]
1	20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,000	20,000 ± 0,001
2	20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,000	19,999 ± 0,000
3	20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,000	19,998 ± 0,001
4	20,000 ± 0,000	20,004 ± 0,001	20,002 ± 0,000
5	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	20,000 ± 0,000
6	20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,001	19,998 ± 0,000
7	20,000 ± 0,000	20,002 ± 0,001	19,999 ± 0,001
8	20,000 ± 0,000	20,002 ± 0,000	19,999 ± 0,001
9	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001
10	20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,000	19,999 ± 0,001
11	20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,001	19,998 ± 0,000
12	20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,001	19,998 ± 0,001



Graf 6 Porovnání rozměrové přesnosti při broušení s  
procesní kapalinou - úběr 1 mm

Z grafu č.6 a tabulky č.21 lze stanovit, že při broušení s procesní kapalinou a úběru 1 mm nedochází po 24 hodinách po broušení ke smrštění materiálu vlivem navlhnutí od procesní kapaliny. Z naměřených hodnot nelze jednoznačně určit, který materiál měl nejlepší a nejhorší rozměrovou stabilitu.

Z tabulek č.18 až 21 a grafů č.3 až 6 lze určit následující:

- Kompozitní materiály mají oproti kovovým materiálům několikanásobnou tepelnou roztažnost (hodnota tepelné roztažnosti kompozitu klesá s rostoucím obsahem plniva). Ta způsobuje poměrně velkou změnu rozměrů po procesu broušení.
- Při delším použití procesní kapaliny během broušení dochází k nasákavosti materiálů, čímž dochází ke zvětšení rozměru.
- Větší množství rýžových slupek má za následek lepší rozměrovou stabilitu.

### **3.2.3 Velikost řezných sil**

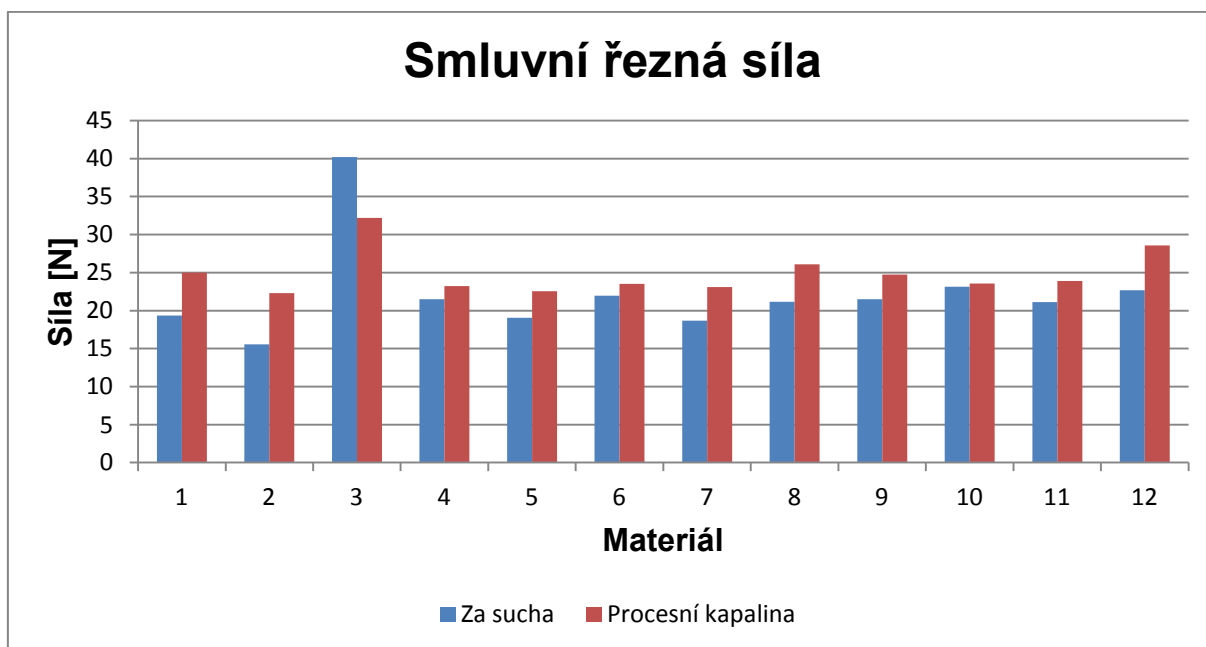
Pro měření velikosti řezných sil byl použit přístroj podle metodiky uvedené v kapitole 3.1.3. Pro vyhodnocení smluvní vyjiskřovací fáze broušení byl použit průběh kolmé řezné síly  $F_{CN}$ . Řezná síla se měřila na každém vzorku celkem desetkrát při hloubce záběru 0,1 mm a následně se vypočítal aritmetický průměr. Pro každé vyhodnocení bylo použito celkem 6 píků a z každého píku se měřila střední hodnota. Jednotková smluvní kolmá řezná síla je řezná síla vztažena na šířku obrobku 1 mm.

Dále byla měřena maximální řezná síla. Jedná se o sílu při prvním přejezdu kotouče, kdy dojde k úběru cca. 90 % hloubky záběru. Maximální řezná síla byla měřena také při úběru materiálu 0,1 mm celkem desetkrát a poté se vypočítal aritmetický průměr. V příloze 3 jsou uvedeny velikosti řezných sil pro jednotlivé vzorky.

## Smluvní jednotková řezná síla $F_{CN}$

Tabulka 22 Výsledné hodnoty smluvní řezné síly

Smluvní řezná síla		
Materiál	Za sucha [N]	Procesní kapalina [N]
1	19,330 ± 0,250	25,000 ± 0,320
2	15,550 ± 0,360	22,280 ± 0,370
3	40,220 ± 0,860	32,180 ± 0,320
4	21,510 ± 0,890	23,210 ± 0,420
5	19,040 ± 0,400	22,540 ± 0,480
6	21,970 ± 0,690	23,520 ± 0,420
7	18,690 ± 0,360	23,100 ± 0,350
8	21,170 ± 0,360	26,100 ± 0,330
9	21,490 ± 0,510	24,730 ± 0,570
10	23,140 ± 0,260	23,550 ± 0,440
11	21,120 ± 0,300	23,880 ± 0,370
12	22,660 ± 0,560	28,590 ± 0,720



Graf 7 Porovnání smluvní řezné síly



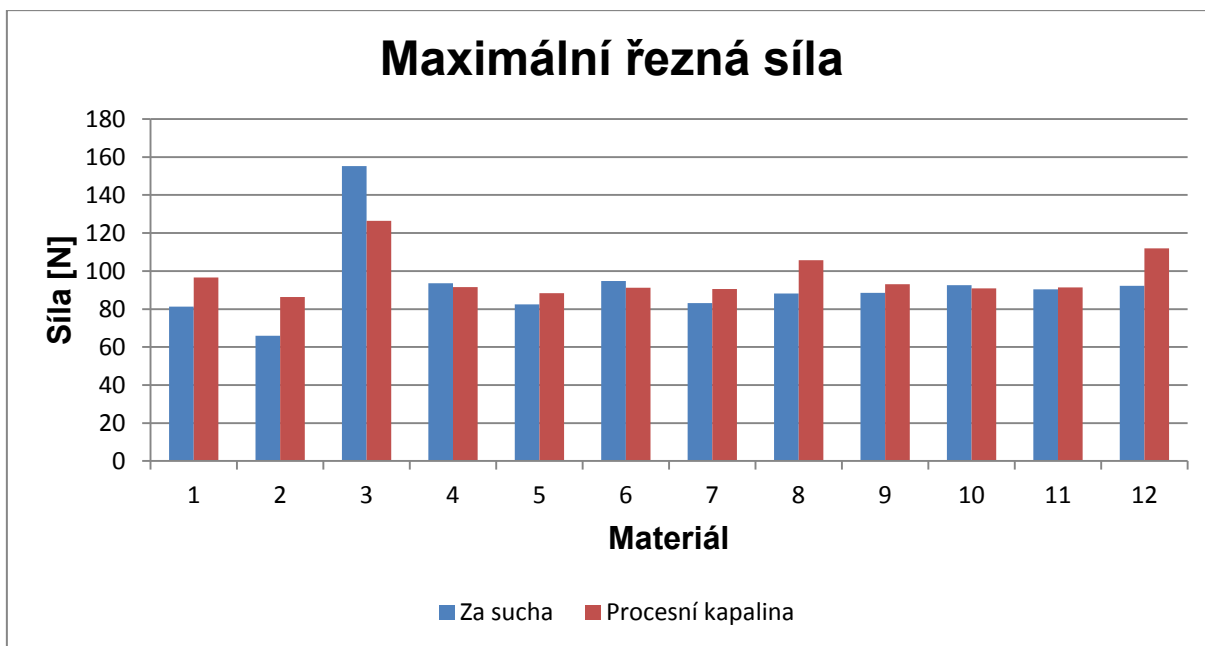
Z tabulky č.22 a grafu č.7 lze konstatovat, že nejmenší (nejlepší) smluvní řezné síly se při broušení za sucha i s procesní kapalinou dosáhlo u materiálu 2 (bez plniva). Menších sil se dosahovalo i u materiálů 1 (bez plniva), 5 (0,2 dsk namletých rýžových slupek) a 7 (1,2 dsk namletých rýžových slupek). Důvodem je malé množství rýžových slupek. Naopak nejhorších (největších) výsledků se dosahovalo při obou prostředích u materiálu 3 (40,0 dsk uhlíková vlákna). Vysvětlením je velká pevnost uhlíkových vláken.

**Zajímavost:** Hodnoty smluvních řezných sil byly naměřeny mnohem menší než při obrábění kovů. Pro ocel 12 050 se při stejných řezných podmínkách, ale menší hloubce záběru (0,02 mm), dosáhlo smluvních řezných sil při broušení za sucha v rozmezí 60-80 N, kdežto u kompozitních materiálů v rozmezí 15-40 N.

### Maximální řezná síla

*Tabulka 23 Výsledné hodnoty maximální řezné síly*

Maximální řezná síla		
Materiál	Za sucha [N]	Procesní kapalina [N]
1	81,270 ± 2,160	96,610 ± 2,330
2	66,010 ± 1,300	86,390 ± 1,490
3	155,300 ± 2,150	126,420 ± 1,550
4	93,600 ± 2,770	91,540 ± 3,010
5	82,490 ± 0,690	88,340 ± 2,070
6	94,700 ± 1,910	91,150 ± 1,770
7	83,140 ± 1,630	90,590 ± 1,290
8	88,130 ± 1,290	105,710 ± 2,180
9	88,570 ± 1,040	93,090 ± 1,200
10	92,630 ± 3,090	90,800 ± 1,230
11	90,350 ± 1,810	91,390 ± 2,800
12	92,210 ± 1,780	112,000 ± 1,710



*Graf 8 Porovnání maximální řezná síla*

Z tabulky č.23 a grafu č.8 lze formulovat, že výsledky jsou stejné, jako u měření smluvní řezné síly. Nejmenších (nejlepších) hodnot se dosahovalo u materiálů bez plniva, nejlépe dopadl materiál 2 (bez plniva). Důvodem je malé množství rýžových slupek. Naopak nejhorších (největších) hodnot bylo naměřeno u materiálu 3 (40,0 dsk uhlíková vlákna). Uhlíková vlákna mají velkou pevnost.

**Zajímavost:** Maximální řezné síly u kompozitních materiálů byly mnohem menší než při broušení kovů. Při porovnání ocele 12 050 s kompozitními materiály se při stejných řezných podmínkách, ale menší hloubce záběru (0,02 mm), dosáhlo mnohem větších maximálních řezných sil při broušení za sucha. Hodnoty maximálních sil u broušení kovů se pohybovaly v rozmezí 200-250 N, kdežto u kompozitních materiálů v rozmezí 70-150 N.

Z naměřených hodnot lze stanovit:

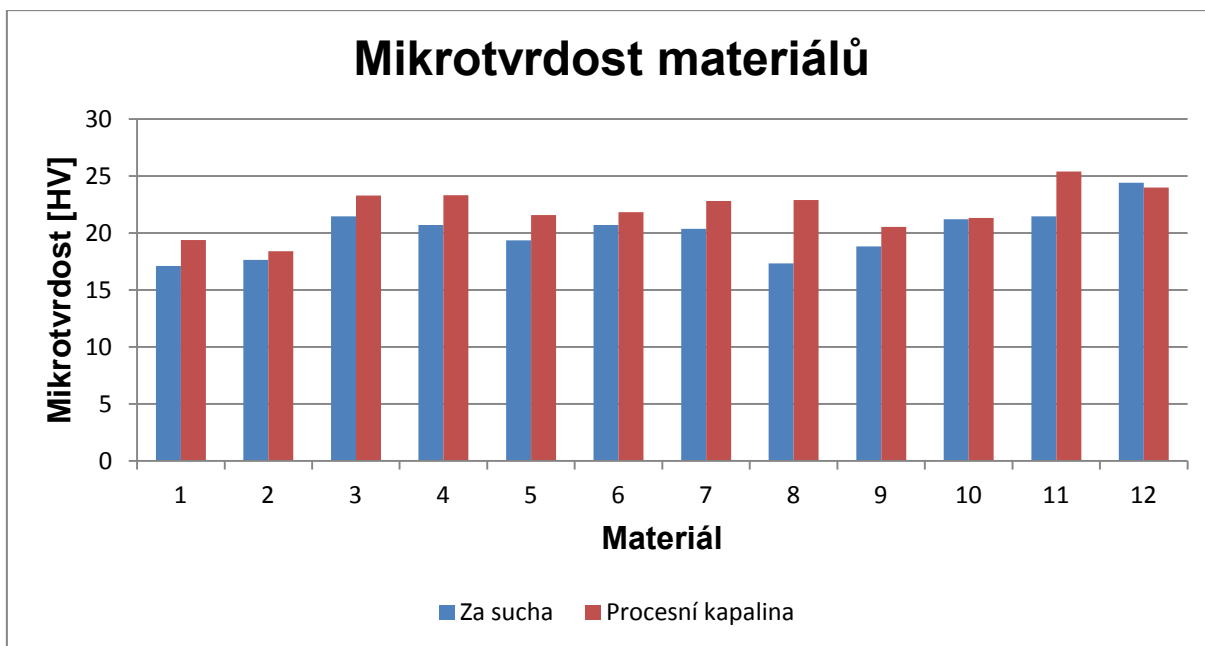
- Kromě materiálu 3 se ve všech případech dosáhlo větší smluvní řezné síly při broušení s procesní kapalinou. To je způsobeno vznikem menších teplot během broušení a materiál klade větší odpor.
- Čím více množství rýžových slupek, tím vznikají větší smluvní řezné síly.
- U kompozitních materiálů vznikají během broušení menší řezné síly, než u broušení kovů. Tím se snižuje i potřebný příkon obráběcího stroje.

### 3.2.4 Mikrotvrдость

Mikrotvrдость materiálů byla měřena na přístroji dle metodiky uvedené v kapitole 3.1.3. Vyhodnocení mikrotvrđosti proběhlo podle Vickerse. Tvar indentoru pro měření podle Vickerse je rovnostranný jehlan s vrcholovým úhlem 136°. Při vytvoření vpichu v materiálu došlo k odměření velikosti úhlopříček, které identor vytvořil. Ze dvou úhlopříček se vypočítala průměrná hodnota a následně došlo k odečtení výsledné hodnoty tvrdosti podle Vickerse z tabulek. Na každém vzorku proběhlo celkem 5 měření mikrotvrđosti na různých místech, ze kterého se vypočítala aritmetická hodnota. V příloze 4 jsou uvedeny mikrotvrđosti pro jednotlivé vzorky.

*Tabulka 24 Mikrotvrđost vzorků při broušení za sucha i s procesní kapalinou*

Mikrotvrđost materiálů		
Materiál	Za sucha [HV]	Procesní kapalina [HV]
1	17,100 ± 1,120	19,390 ± 0,860
2	17,640 ± 0,430	18,390 ± 1,380
3	21,460 ± 1,480	23,300 ± 0,960
4	20,700 ± 0,500	23,310 ± 1,210
5	19,350 ± 0,850	21,570 ± 1,190
6	20,700 ± 0,920	21,820 ± 1,040
7	20,370 ± 0,990	22,820 ± 0,930
8	17,330 ± 0,500	22,910 ± 0,570
9	18,830 ± 0,850	20,540 ± 0,410
10	21,200 ± 1,080	21,310 ± 0,460
11	21,450 ± 0,940	25,400 ± 0,590
12	24,410 ± 0,610	23,990 ± 0,750



*Graf 9 Porovnání mikrotvrdosti jednotlivých materiálů*

Z tabulky č.24 a grafu č.9 lze stanovit, že nejmenší mikrotvrdostí se dosáhlo u materiálů, která neobsahovala žádná plniva. Jedná se o materiály 1 a 2 (bez plniva). Naopak materiály s větším množstvím plniva mají větší mikrotvrdost. Největších hodnot se dosáhlo u materiálů 11 (20,0 dsk namletých rýžových slupek) a 12 (50,0 dsk namletých rýžových slupek).

Z naměřených hodnot lze určit:

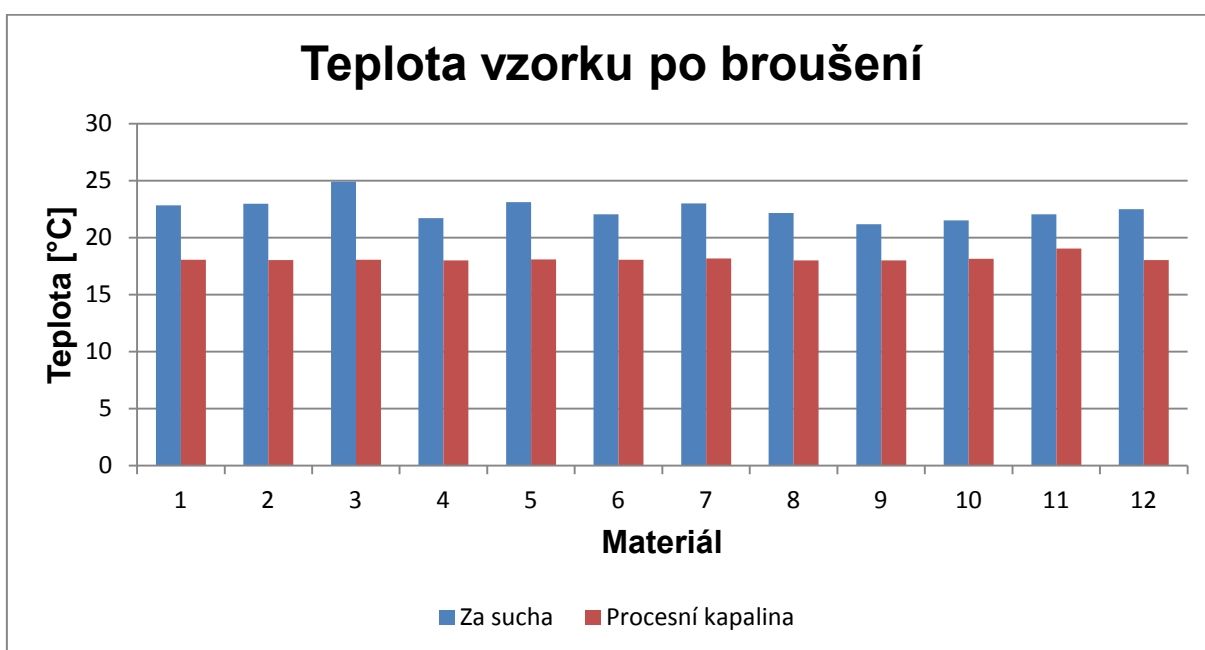
- Větší mikrotvrdosti materiálů se dosáhlo po broušení s procesní kapalinou.
- Čím větší množství plniva (uhlíková vlákna, namleté rýžové slupky), tím větší mikrotvrdost.

### 3.2.5 Teplota

Pro měření teploty byl použit přístroj podle metodiky v kapitole 3.1.3. Při měření teploty se nejprve změřila teplota v laboratoři před broušením a následně byla měřena teplota vzorku po broušení, po úběru 0,1 mm při 14 přejezdech, resp. 7 dvoj zdvích. U každého vzorku došlo k 10ti měřením a následně vypočítána aritmetická hodnota. Následně došlo k vypočítání rozdílu teplot a zjištěno, u kterého materiálu došlo k největšímu zahřátí nebo ochlazení při broušení. V příloze 5 jsou uvedeny teploty pro jednotlivé vzorky.

Tabulka 25 Teploty vzorku při broušení

Teplota materiálů po broušení		
Materiál	Za sucha [°C]	Procesní kapalina [°C]
1	22,830 ± 0,050	18,070 ± 0,020
2	22,970 ± 0,040	18,040 ± 0,020
3	24,920 ± 0,050	18,080 ± 0,020
4	21,710 ± 0,040	18,000 ± 0,030
5	23,130 ± 0,020	18,100 ± 0,030
6	22,060 ± 0,040	18,070 ± 0,020
7	23,010 ± 0,040	18,190 ± 0,020
8	22,170 ± 0,040	18,020 ± 0,020
9	21,180 ± 0,020	18,020 ± 0,020
10	21,510 ± 0,040	18,160 ± 0,020
11	22,040 ± 0,040	19,050 ± 0,030
12	22,510 ± 0,020	18,040 ± 0,020



Graf 10 Porovnání teplot materiálů po broušení

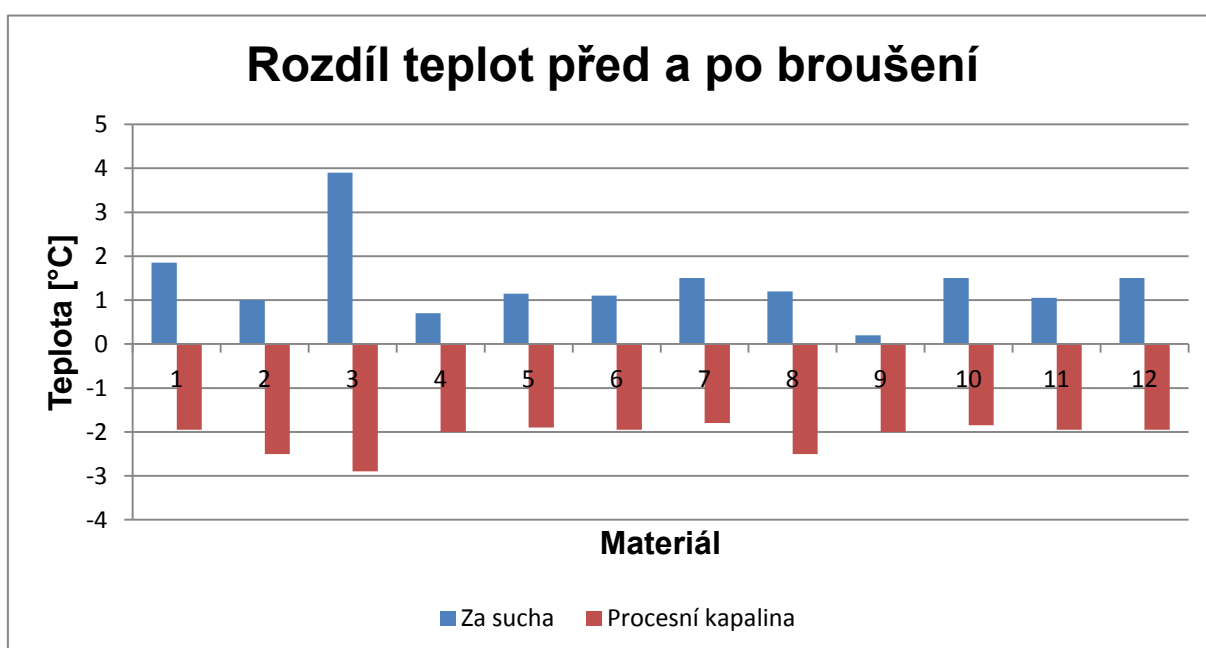
Z tabulky č.25 a grafu č.10 lze stanovit, že největších teplot po broušení bez procesní kapaliny se dosáhlo u materiálu 3 (40,0 dsk uhlíková vlákna). Důvodem je větší zahřátí uhlíkových vláken než rýžových slupek nebo materiálů bez plniva. Nejmenší teploty se dosáhlo u materiálu 9 (5,0 dsk namletých rýžových slupek). Nelze

ale jednoznačně určit, zda množství plniva má vliv na velikost teploty, protože rozdíly jsou nepatrné a pohybují se v rozmezí 22 až 23 °C.

Při broušení s procesní kapalinou nelze jednoznačně určit, u jakého materiálu se dosáhlo nejmenší a největší teploty, protože procesní kapalina ochladila skoro všechny materiály na stejnou teplotu (18 °C).

*Tabulka 26 Rozdíly teplot před a během broušení*

Rozdíl teplot před a po broušení		
Materiál	Za sucha [°C]	Procesní kapalina [°C]
1	1,850	-1,950
2	1,000	-2,500
3	3,900	-2,900
4	0,700	-2,000
5	1,150	-1,900
6	1,100	-1,950
7	1,500	-1,800
8	1,200	-2,500
9	0,200	-2,000
10	1,500	-1,850
11	1,050	-1,950
12	1,500	-1,950



*Graf 11 Porovnání rozdílu teplot před a po broušení*

Rozdíly teplot před a po broušení se odvíjejí od teplot materiálu, které vznikly ihned po broušení. Experiment probíhal v laboratoři, kde byli konstantní podmínky, proto jsou výsledky podobné, jako u vyhodnocení teploty materiálu po broušení.

Největšího rozdílu teplot při broušení bez procesní kapaliny se dosáhlo u materiálu 3 (40,0 dsk uhlíková vlákna). Důvodem je větší zahřátí uhlíkových vláken než rýžových slupek. Naopak nejmenšího rozdílu teplot při broušení bez procesní kapaliny se dosáhlo u materiálu 9 (5,0 dsk namletých rýžových slupek).

U broušení s procesní kapalinou nelze jednoznačně určit, u jakého materiálu vznikl nejmenší nebo největší rozdíl teplot.

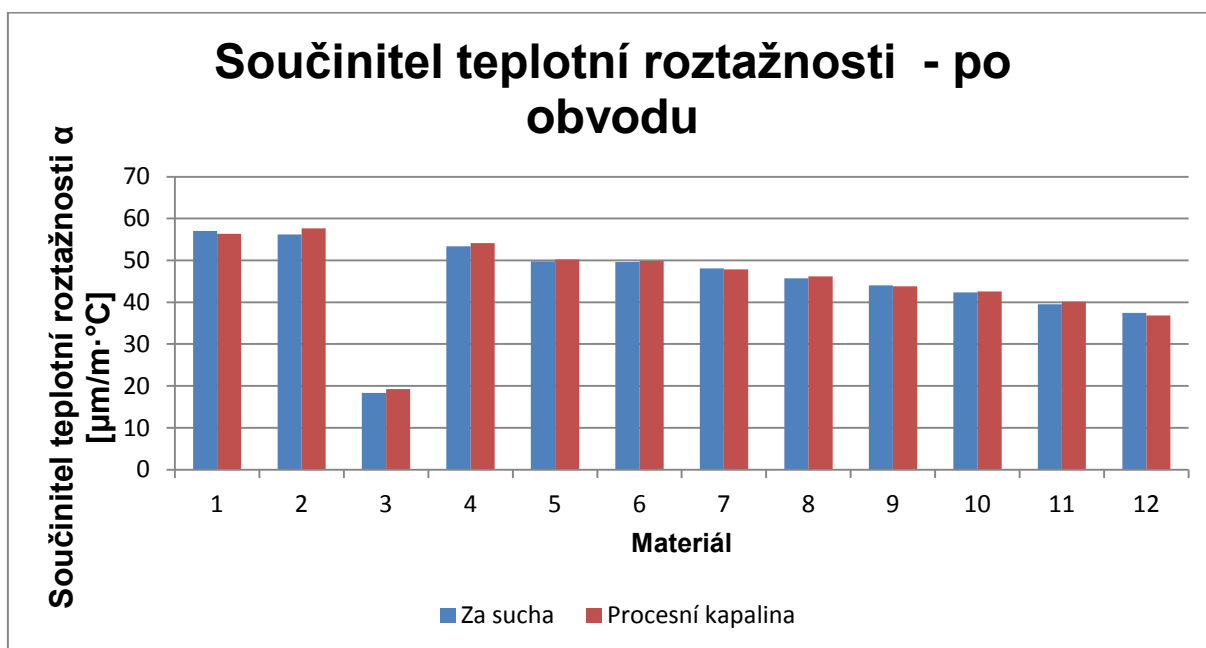
### 3.2.6 Součinitel teplotní roztažnosti

Pro měření součinitele tepelné roztažnosti byl použit přístroj podle metodiky v kapitole 3.1.3. Součinitel tepelné roztažnosti materiálů byl měřen na dvou místech - po obvodu vzorku (na výšku) a na tloušťce (šířce) vzorku. Nejprve se změřil rozměr vzorku pomocí digitálního mikrometru s přesností 0,001 mm a následně se vzorek umístil pod úchylkoměr, kde došlo k vynulování. Následně se vzorek umístil do mrazáku, kde byla nastavena hodnota -20 °C. Po 24 hodinách se vzorek z mrazáku vytáhl a ihned se změřilo na úchylkoměru, k jaké odchylce rozměru došlo. Následně se podle vzorce číslo 2 změřila tepelná roztažnost  $\alpha \left[ \frac{\mu\text{m}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$ . V příloze 5 jsou uvedeny součinitele teplotní roztažnosti pro jednotlivé vzorky.

Tepelná roztažnost se měřila při změně teploty z teploty laboratoře na teplotu -20 °C. Pomocí vzorce číslo 2 a vypočítaného součinitele tepelné roztažnosti se vypočítala odchylka rozměru pro jiné teploty - horní teplotní mez (30 °C, 40 °C, 55 °C, 70 °C) a dolní teplotní mez (5 °C, -10 °C, -25 °C, -40 °C).

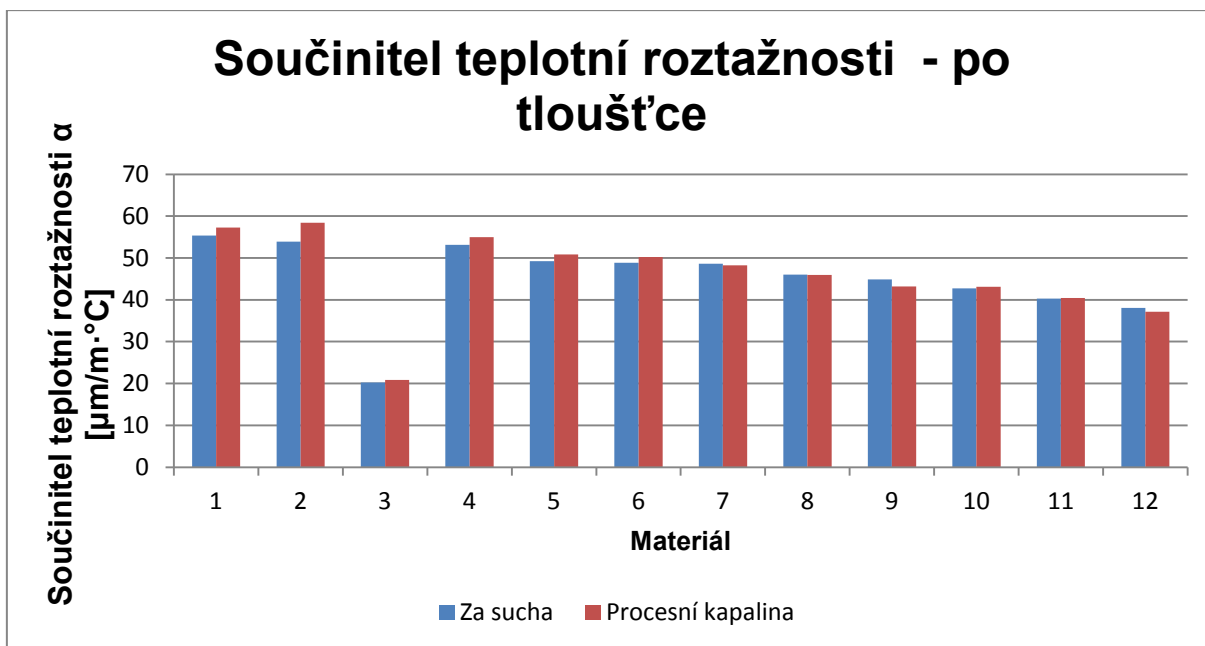
Tabulka 27 Součinitel teplotní roztažnosti  $\alpha \left[ \frac{\mu\text{m}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$

SOUČINITEL TEPLITNÍ ROZTAŽNOSTI				
Materiál	Po obvodu		Po tloušťce	
	Za sucha $\left[ \frac{\mu\text{m}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$	Procesní kapalina $\left[ \frac{\mu\text{m}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$	Za sucha $\left[ \frac{\mu\text{m}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$	Procesní kapalina $\left[ \frac{\mu\text{m}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$
1	57,072 ± 0,155	56,341 ± 0,063	55,389 ± 0,150	57,253 ± 0,086
2	56,187 ± 0,158	57,657 ± 0,139	53,893 ± 0,215	58,446 ± 0,262
3	18,338 ± 0,356	19,252 ± 0,088	20,230 ± 0,074	20,873 ± 0,168
4	53,392 ± 0,383	54,146 ± 0,217	53,130 ± 0,187	54,942 ± 0,219
5	49,805 ± 0,201	50,237 ± 0,194	49,231 ± 0,112	50,837 ± 0,129
6	49,623 ± 0,179	49,871 ± 0,200	48,888 ± 0,164	50,224 ± 0,139
7	48,059 ± 0,088	47,822 ± 0,206	48,586 ± 0,295	48,236 ± 0,166
8	45,719 ± 0,105	46,166 ± 0,216	45,990 ± 0,114	45,914 ± 0,199
9	44,005 ± 0,139	43,812 ± 0,247	44,839 ± 0,192	43,217 ± 0,143
10	42,349 ± 0,117	42,554 ± 0,125	42,764 ± 0,145	43,139 ± 0,158
11	39,538 ± 0,268	40,099 ± 0,155	40,268 ± 0,155	40,465 ± 0,205
12	37,449 ± 0,185	36,870 ± 0,221	38,100 ± 0,180	37,136 ± 0,138



Graf 12 Porovnání součinitele teplotní roztažnosti vzorků po obvodu





*Graf 13 Porovnání součinitele teplotní roztažnosti vzorků po tloušťce*

Z tabulky č.27 a grafů č.12 a 13 je patrné, že nejmenších hodnot součinitele teplotní roztažnosti se dosáhlo u materiálu 3 (40,0 dsk uhlíková vlákna). Příčinou jsou uhlíková vlákna, která mají sami o sobě nízkou hodnotu teplotní roztažnosti. Nejvyšších hodnot součinitele teplotní roztažnosti se dosáhlo u materiálů, která nemají plniva. Proto nejhůře dopadly materiály 1, 2 a 3. Prostředí (broušení bez nebo s procesní kapalinou) nemá vliv na velikost součinitele teplotní roztažnosti.

Z naměřených hodnot lze stanovit:

- Čím více plniva (uhlíková vlákna, namleté rýžové slupky) se použije, tím součinitel teplotní roztažnosti klesá.
- Součinitel teplotní roztažnosti má vliv na rozměrovou stabilitu. Proto materiály s větším množstvím plniva (namletých rýžových slupek) měly větší rozměrovou stabilitu.
- Broušení bez nebo s procesní kapalinou nemá vliv na velikost součinitele teplotní roztažnosti.

V následujících tabulkách (viz. tabulka č.28, 29, 30 a 31) jsou zpřehledněny odchylky rozměrů pro různé teploty při změřeném součiniteli teplotní roztažnosti  $\alpha$ . Velikost odchylek se odvíjí od délky vzorku před změnou teploty a součinitele teplotní roztažnosti.

Tabulka 28 Odchylyky rozměrů pro různé teploty - broušení za sucha, po obvodu

Odchylnka $\Delta l$ [ $\mu\text{m}$ ] pro různé teploty při broušení za sucha									
Materiál	Délka vzorku před změnou teploty [mm]	Teplota							
		-40 °C	-25 °C	-10 °C	5 °C	30 °C	40 °C	55 °C	70 °C
1	26,382	-93,4	-70,8	-48,2	-25,6	12,0	27,1	49,7	72,3
2	26,425	-92,1	-69,8	-47,5	-25,2	11,9	26,7	49,0	71,3
3	26,254	-29,8	-22,6	-15,4	-8,2	3,9	8,7	15,9	23,1
4	26,476	-87,6	-66,4	-45,2	-24,0	11,3	25,4	46,6	67,9
5	26,285	-81,2	-61,5	-41,9	-22,3	10,5	23,6	43,2	62,8
6	26,278	-80,8	-61,3	-41,7	-22,2	10,4	23,5	43,0	62,6
7	26,423	-78,7	-59,7	-40,6	-21,6	10,2	22,9	41,9	61,0
8	26,174	-74,2	-56,2	-38,3	-20,3	9,6	21,5	39,5	57,4
9	26,222	-71,5	-54,2	-36,9	-19,6	9,2	20,8	38,1	55,4
10	26,264	-69,0	-52,3	-35,6	-18,9	8,9	20,0	36,7	53,4
11	26,241	-64,3	-48,8	-33,2	-17,6	8,3	18,7	34,2	49,8
12	26,088	-60,6	-45,9	-31,3	-16,6	7,8	17,6	32,2	46,9

Tabulka 29 Odchylyky rozměrů pro různé teploty - broušení s proces. kap., po obvodu

Odchylnka $\Delta l$ [ $\mu\text{m}$ ] pro různé teploty při broušení s procesní kapalinou									
Materiál	Délka vzorku před změnou teploty [mm]	Teplota							
		-40 °C	-25 °C	-10 °C	5 °C	30 °C	40 °C	55 °C	70 °C
1	26,334	-91,8	-69,6	-47,3	-25,1	12,0	26,9	49,1	71,4
2	26,094	-93,1	-70,6	-48,0	-25,4	12,2	27,2	49,8	72,4
3	26,317	-31,4	-23,8	-16,2	-8,6	4,1	9,2	16,8	24,4
4	26,163	-87,7	-66,4	-45,2	-23,9	11,5	25,6	46,9	68,1
5	26,240	-81,6	-61,8	-42,1	-22,3	10,7	23,9	43,6	63,4
6	26,273	-81,1	-61,5	-41,8	-22,1	10,6	23,7	43,4	63,0
7	26,336	-78,0	-59,1	-40,2	-21,3	10,2	22,8	41,7	60,6
8	26,293	-75,1	-56,9	-38,7	-20,5	9,8	22,0	40,2	58,4
9	26,193	-71,0	-53,8	-36,6	-19,4	9,3	20,8	38,0	55,2
10	26,550	-69,9	-53,0	-36,0	-19,1	9,2	20,4	37,4	54,3
11	26,249	-65,2	-49,4	-33,6	-17,8	8,5	19,1	34,8	50,6
12	26,244	-59,9	-45,4	-30,9	-16,4	7,8	17,5	32,0	46,5

Tabulka 30 Odchyly rozměrů pro různé teploty - broušení za sucha, po tloušťce

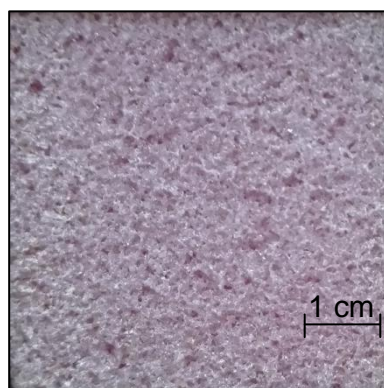
Odchylna $\Delta l$ [ $\mu\text{m}$ ] pro různé teploty při broušení za sucha									
Materiál	Délka vzorku před změnou teploty [mm]	Teplota							
		-40 °C	-25 °C	-10 °C	5 °C	30 °C	40 °C	55 °C	70 °C
1	1,528	-5,1	-3,8	-2,6	-1,3	0,8	1,7	2,9	4,2
2	1,759	-5,7	-4,3	-2,9	-1,4	0,9	1,9	3,3	4,7
3	4,378	-5,3	-4,0	-2,7	-1,3	0,9	1,8	3,1	4,4
4	1,333	-4,3	-3,2	-2,1	-1,1	0,7	1,4	2,5	3,5
5	1,756	-5,2	-3,9	-2,6	-1,3	0,8	1,7	3,0	4,3
6	1,460	-4,3	-3,2	-2,2	-1,1	0,7	1,4	2,5	3,6
7	1,670	-4,9	-3,7	-2,5	-1,2	0,8	1,6	2,8	4,0
8	1,678	-4,6	-3,5	-2,3	-1,2	0,8	1,5	2,7	3,8
9	1,496	-4,0	-3,0	-2,0	-1,0	0,7	1,3	2,3	3,3
10	1,574	-4,1	-3,0	-2,0	-1,0	0,7	1,3	2,3	3,4
11	1,583	-3,8	-2,9	-1,9	-1,0	0,6	1,3	2,2	3,2
12	1,470	-3,4	-2,5	-1,7	-0,9	0,5	1,1	1,9	2,8

Tabulka 31 Odchyly rozměrů pro různé teploty - broušení s proces.kap., po tloušťce

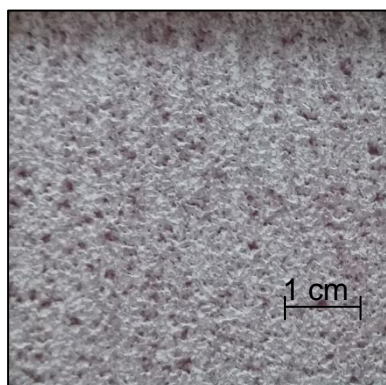
Odchylna $\Delta l$ [ $\mu\text{m}$ ] pro různé teploty při broušení s procesní kapalinou									
Materiál	Délka vzorku před změnou teploty [mm]	Teplota							
		-40 °C	-25 °C	-10 °C	5 °C	30 °C	40 °C	55 °C	70 °C
1	2,108	-7,3	-5,5	-3,7	-1,8	1,2	2,4	4,2	6,0
2	1,498	-5,3	-4,0	-2,7	-1,3	0,8	1,7	3,0	4,4
3	4,010	-5,0	-3,8	-2,5	-1,3	0,8	1,6	2,9	4,2
4	2,860	-9,5	-7,1	-4,8	-2,4	1,5	3,1	5,5	7,8
5	1,906	-5,8	-4,4	-2,9	-1,5	0,9	1,9	3,4	4,8
6	2,679	-8,1	-6,1	-4,1	-2,1	1,3	2,7	4,7	6,7
7	2,627	-7,6	-5,7	-3,8	-1,9	1,2	2,5	4,4	6,3
8	1,139	-3,2	-2,4	-1,6	-0,8	0,5	1,0	1,8	2,6
9	2,850	-7,4	-5,6	-3,7	-1,9	1,2	2,4	4,3	6,1
10	3,041	-7,9	-5,9	-4,0	-2,0	1,3	2,6	4,6	6,5
11	3,215	-7,8	-5,9	-3,9	-2,0	1,3	2,6	4,5	6,5
12	3,788	-8,5	-6,4	-4,3	-2,2	1,4	2,8	4,9	7,0

### 3.2.7 Zanesení kotouče

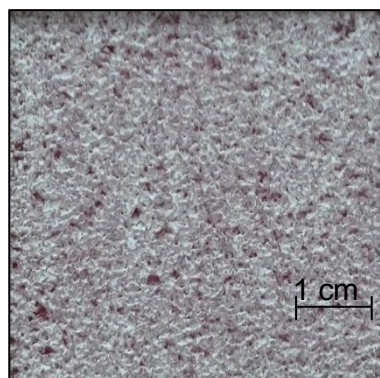
Při měření řezných sil, kde došlo postupným úběrem 0,1 mm až k celkovému úběru 1 mm, se také porovnávalo zanesení brousicího kotouče. Porovnával se orovnaný kotouč s opotřeбенým (zanešeným) kotoučem. Pro orovnění brousicího kotouče se používal jednokamenový diamantový orovnávač (viz. kapitola 3.1.3).



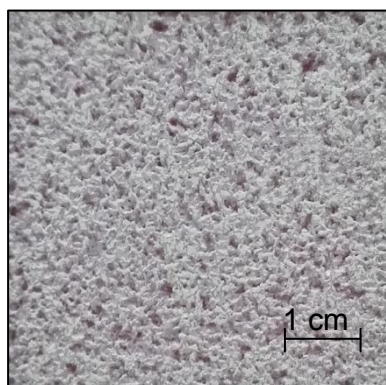
*Obrázek 38 Orovnaný kotouč jednokamenovým  
diamantovým orovnávačem.*



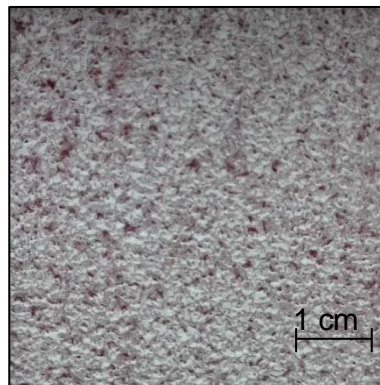
*Obrázek 39.1 Zanesený kotouč po  
broušení za sucha materiálu č.1.*



*Obrázek 39.2 Zanesený kotouč po  
broušení za sucha materiálu č.2.*

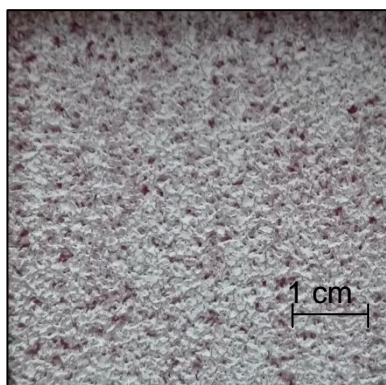


*Obrázek 39.3 Zanesený kotouč po  
broušení za sucha materiálu č.3.*

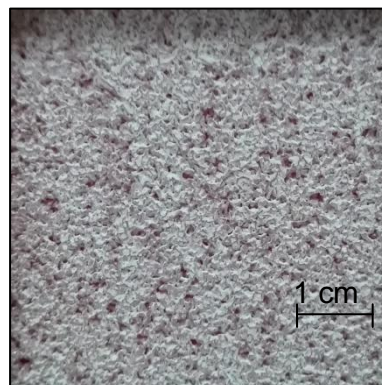


*Obrázek 39.4 Zanesený kotouč po  
broušení za sucha materiálu č.4.*

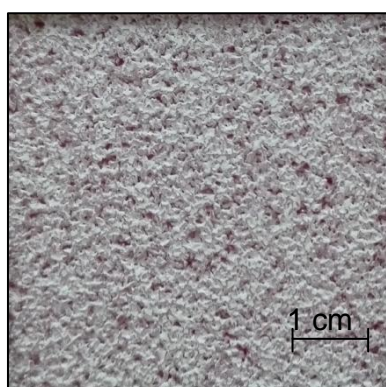




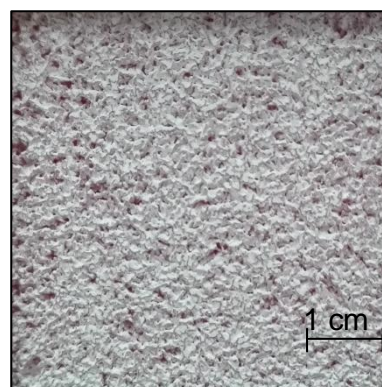
Obrázek 39.5 Zanesený kotouč po broušení za sucha materiálu č.5.



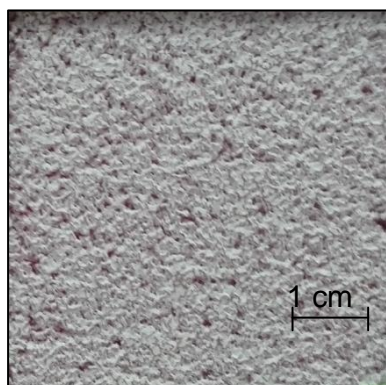
Obrázek 39.6 Zanesený kotouč po broušení za sucha materiálu č.6.



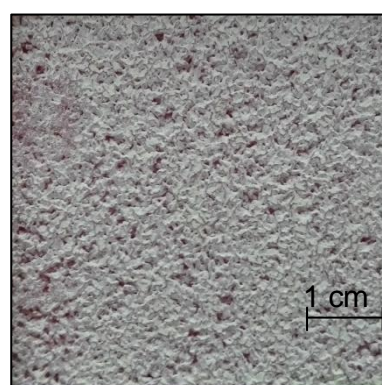
Obrázek 39.7 Zanesený kotouč po broušení za sucha materiálu č.7.



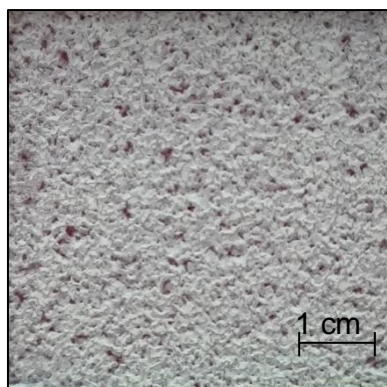
Obrázek 39.8 Zanesený kotouč po broušení za sucha materiálu č.8.



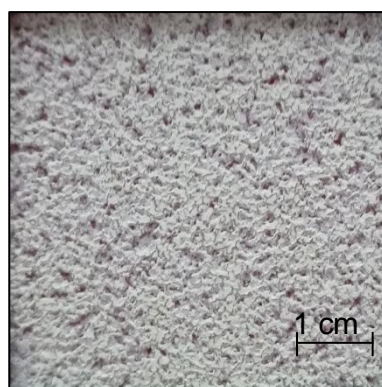
Obrázek 39.9 Zanesený kotouč po broušení za sucha materiálu č.9.



Obrázek 39.10 Zanesený kotouč po broušení za sucha materiálu č.10.

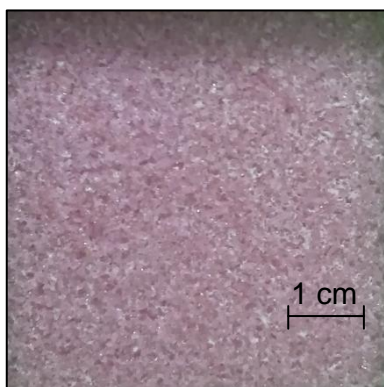


Obrázek 39.11 Zanesený kotouč po  
broušení za sucha materiálu č.11

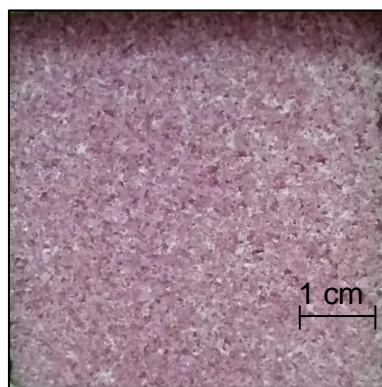


Obrázek 39.12 Zanesený kotouč po  
broušení za sucha materiálu č.12.

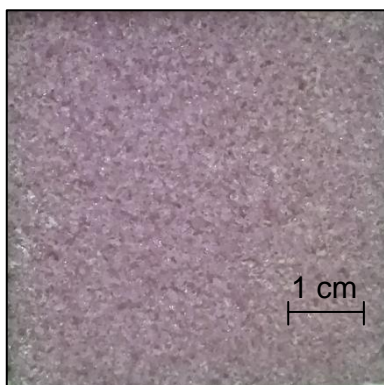
Při broušení za sucha dochází k velkému zanesení pórů brousicího kotouče. Zanesení má vliv na drsnost povrchu materiálů, protože způsobuje vyhlazení kotouče. Z obrázků 37.1 - 37.12 nelze jednoznačně určit, zda větší či menší podíl disk. rýžových slupek způsobuje větší nebo menší zanesení brousicího kotouče.



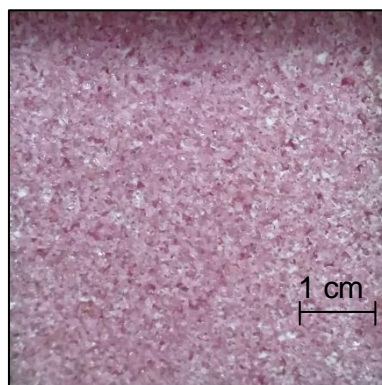
Obrázek 40.1 Zanesený kotouč po  
broušení s procesní kapalinou mat. č.1.



Obrázek 40.2 Zanesený kotouč po  
broušení s procesní kapalinou mat. č.2.

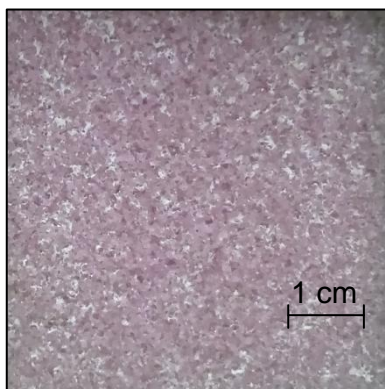


Obrázek 40.3 Zanesený kotouč po  
broušení s procesní kapalinou mat. č.3.

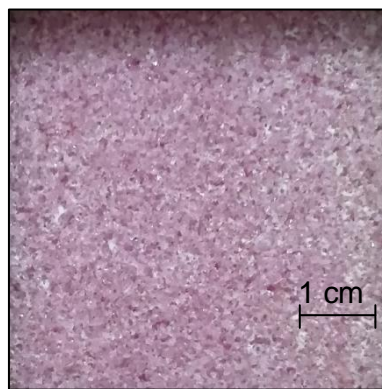


Obrázek 40.4 Zanesený kotouč po  
broušení s procesní kapalinou mat. č.4.

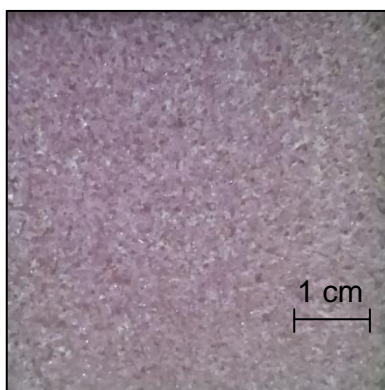




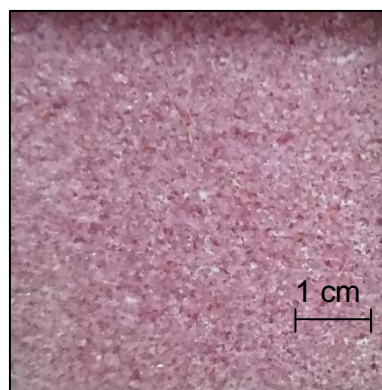
Obrázek 40.5 Zanesený kotouč po  
broušení s procesní kapalinou mat. č.5.



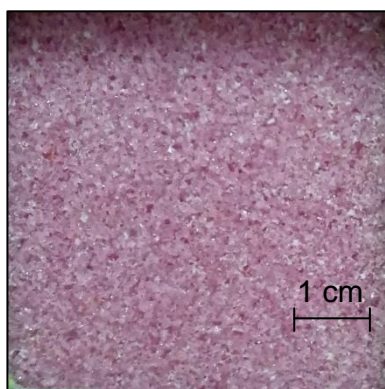
Obrázek 40.6 Zanesený kotouč po  
broušení s procesní kapalinou mat. č.6.



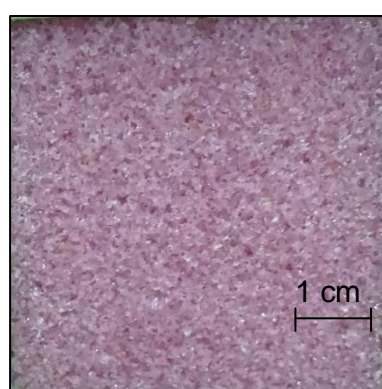
Obrázek 40.7 Zanesený kotouč po  
broušení s procesní kapalinou mat. č.7.



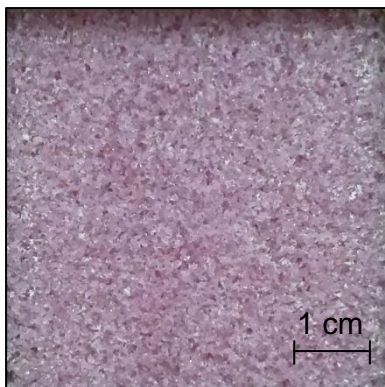
Obrázek 40.8 Zanesený kotouč po  
broušení s procesní kapalinou mat. č.8.



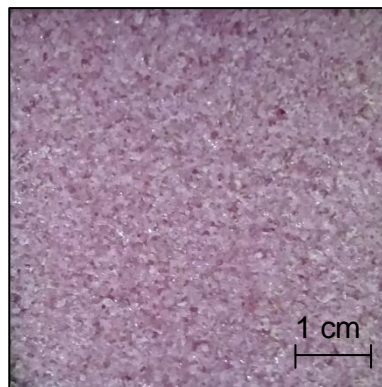
Obrázek 40.9 Zanesený kotouč po  
broušení s procesní kapalinou mat. č.9.



Obrázek 40.10 Zanesený kotouč po  
broušení s procesní kapalinou mat. č.10.



*Obrázek 40.11 Zanesený kotouč po  
broušení s procesní kapalinou mat. č.1*



*Obrázek 40.12 Zanesený kotouč po  
broušení s procesní kapalinou mat.  
č.12.*

Při broušení s procesní kapalinou není vidět významný rozdíl v zanesení kotouče mezi jednotlivými broušenými materiály, protože procesní kapalina má dobrý vyplachovací účinek a nezanechává broušený materiál mezi póry brousícího kotouče.



## 4. Diskuze dosažených výsledků

Diplomová práce je zaměřena na chování kompozitních materiálů na bázi reaktoplastu při broušení.

Hlavním cílem předkládané práce je výběr vhodného kompozitního materiálu pro měřicí a automatizační techniku (dotekové měření - doteky komparátorů, 3D měřicích strojů, koncové měrky, spároměrky, atd.).

K dosažení cíle bylo nutné připravit vzorky pro realizaci experimentu, navrhnout řezné podmínky a stanovit parametry, kterými se budou jednotlivé materiály porovnávat.

Nezbytné základní pojmy týkající se řešené problematiky, vztahy a definice jsou uvedeny v teoretické části kapitole 2.

Do této části práce jsou zahrnuty přehledně informace o kompozitních materiálech na bázi reaktoplastů (podkapitola 2.1) se zaměřením na epoxidovou pryskyřici (podkapitola 2.1.1), její fyzikální a mechanické vlastnosti (podkapitola 2.1.2) a vyztužující materiály (podkapitola 2.1.3). Dále jsou v teoretické části uvedeny informace k obrábění reaktoplastů (podkapitola 2.2), stručný popis technologie broušení (podkapitola 2.3) v návaznosti na problematiku broušení reaktoplastů (podkapitola 2.3.1).

Hlavním záměrem a cílem byl výběr vhodného kompozitního materiálu z hlediska obrobitelnosti, který by byl uplatněn v oblasti měřicí a automatizační techniky. Vhodně vybraný materiál by byl využit pro výrobu kompozitních měřidel. Měřidla z kompozitního materiálu by sloužila jako levná měřidla s časově omezenou délkou použití oproti standardně používaným ocelovým měřidlům s charakteristickými parametry.

K dosažení cíle je věnována celá kapitola 3. První část (podkapitola 3.1) obsahuje informace o metodice experimentu, kde je pozornost věnována volbě použitých materiálů (podkapitola 3.1.1), metodice experimentu (podkapitola 3.1.2), popisu stroje, nástroje a měřicích přístrojů (podkapitola 3.1.3) a měřeným parametrům (podkapitola 3.1.4). Druhá část (podkapitola 3.2) popisuje výsledky měření, jejich analýzu včetně hodnocení.

K porovnání materiálů se stanovily následující parametry:

1. drsnost povrchu,
2. rozměrová přesnost,
3. řezná síla,
4. mikrotvrdost,
5. teplota,
6. součinitel teplotní roztažnosti,
7. zanesení kotouče.

Z naměřených a vypočítaných výsledků lze stanovit následující:

### **1. Drsnost povrchu**

Nejnižší (nejlepší) hodnoty drsnosti povrchu při broušení bez procesní kapaliny a úběru 0,02 mm se dosáhlo u materiálu 6 (0,5 dsk namletých rýžových slupek). Důvodem nízké hodnoty drsnosti je malé množství plniva (namleté rýžové slupky) a malá hloubka záběru. Naopak největší (nejhorší) hodnoty byly naměřeny u materiálu 3 (40 dsk uhlíkových vláken). To je zapříčiněno plnivem z uhlíkových vláken, která jsou velmi abrazivní a tím zhoršují (zvětšují) drsnost povrchu.

Nejmenších (nejlepších) hodnot drsnosti povrchu po broušení s procesní kapalinou při úběru 0,02 mm se dosáhlo u materiálu 9 (5,0 dsk namletých rýžových slupek) z důvodu menšího množství plniva (namletých rýžových slupek). Naopak nejhorší (největší) drsnost povrchu se naměřila u materiálu 12 (50,0 dsk namletých rýžových slupek). Příčinou je velké množství plniva (největší množství namletých rýžových slupek ze všech použitých materiálů) způsobující větší abrazivitu povrchu a tím se dosáhne horší (větší) drsnosti.

Při broušení za sucha a úběru 1 mm se nejlepší (nejmenší) drsnosti povrchu dosáhlo u materiálu 9 (5,0 dsk namletých rýžových slupek). Vysvětlením nízké hodnoty drsnosti je menší množství plniva (namletých rýžových slupek). Naopak nejhorších (největších) hodnot se dosáhlo u materiálu 12 (50,0 dsk namletých rýžových slupek). To je způsobeno velkým množstvím plniva (namletých rýžových slupek), které způsobí abrazivitu povrchu a tím se dochází ke zvětšení (zhoršení) drsnosti.

Nejmenších (nejlepších) hodnot drsnosti povrchu při broušení s procesní kapalinou a úběru 1 mm se dosáhlo u materiálu 4 (0,2 dsk namletých rýžových slupek). Příčinou je opět malé množství plniva (namletých rýžových slupek). Naopak nejhorších (nejvyšších) výsledků se dosáhlo u materiálu 10 (10,0 dsk namletých rýžových

slupek). Znovu je důvodem větší množství plniva (namletých rýžových slupek). Dosáhne se tím větší abrazivity povrchu a tím zhoršení (zvětšení) drsnosti.

## **2. Rozměrová přesnost**

Při broušení bez procesní kapaliny a úběru 0,02 mm se největší rozměrové stability dosáhlo u materiálů s větším množstvím plniva, která snižují teplotní roztažnost materiálů. Nejlepší rozměrové stability dosáhl materiál 10 (10,0 dsk namletých rýžových slupek). Naopak nejmenší rozměrové stability se dosáhlo u materiálů, která obsahují málo plniva nebo žádné plnivo. Nejhuře dopadl materiál 8 (2,0 dsk namletých rýžových slupek).

U broušení s procesní kapalinou a úběru 0,02 mm nevznikají při broušení vysoké teploty mezi nástrojem a materiálem, tím se zmenšuje teplotní roztažnost materiálů a dochází k lepší rozměrové stabilitě. Proto nelze jednoznačně určit, zda při broušení s procesní kapalinou a hloubce záběru 0,02 mm má množství namletých rýžových slupek vliv na rozměrovou přesnost.

Po broušení bez procesní kapaliny a celkovém úběru 1 mm se nejhorších výsledků dosáhlo u materiálu 3 (40,0 dsk uhlíková vlákna). Důvodem je velké zahřátí materiálu během broušení, materiál fyzicky pracuje a postupem dní se smršťuje. Naopak nejlepších hodnot se dosáhlo u materiálů, která obsahuje větší množství plniva. Patří mezi ně materiály 9 (5,0 dsk namletých rýžových slupek), 10 (10,0 dsk namletých rýžových slupek) a 11 (20,0 dsk namletých rýžových slupek).

Při broušení s procesní kapalinou a úběru 1 mm nedochází po 24 hodinách po broušení ke smrštění materiálu vlivem navlhnutí od procesní kapaliny. Z naměřených hodnot nelze jednoznačně určit, který materiál měl nejlepší a nejhorší rozměrovou stabilitu.

## **3. Řezná síla**

Nejmenší (nejlepší) smluvní i maximální řezné síly se při broušení za sucha i s procesní kapalinou dosáhlo u materiálu 2 (bez plniva). Příčinou je malé množství rýžových slupek. Naopak nejhorších (největších) výsledků se dosahovalo při obou prostředích u materiálu 3 (40,0 dsk uhlíková vlákna). Důvodem je velká pevnost uhlíkových vláken.

#### **4. Mikrotvrdost**

Nejmenší mikrotvrdosti se dosáhlo u materiálů, která neobsahovala žádná plniva. Jedná se o materiály 1 a 2 (bez plniva). Naopak materiály s větším množstvím plniva mají větší mikrotvrdost. Největších hodnot se dosáhlo u materiálů 11 (20,0 dsk namletých rýžových slupek) a 12 (50,0 dsk namletých rýžových slupek).

#### **5. Teplota**

Největších teplot po broušení bez procesní kapaliny se dosáhlo u materiálu 3 (40,0 dsk uhlíková vlákna). Důvodem je větší zahřátí uhlíkových vláken než rýžových slupek nebo materiálů bez plniva. Nejmenší teploty se dosáhlo u materiálu 9 (5,0 dsk namletých rýžových slupek). Nelze ale jednoznačně určit, zda množství plniva má vliv na velikost teploty, protože rozdíly jsou nepatrné a pohybují se v rozmezí 22 až 23 °C.

Při broušení s procesní kapalinou nelze jednoznačně určit, u jakého materiálu se dosáhlo nejmenší a největší teploty, protože procesní kapalina ochladila skoro všechny materiály na stejnou teplotu (18 °C).

Rozdíly teplot před a po broušení se odvíjejí od teplot materiálu, které vznikly ihned po broušení. Experiment probíhal v laboratoři, kde byli konstantní podmínky, proto jsou výsledky stejné, jako u vyhodnocení teploty materiálu po broušení.

#### **6. Součinitel teplotní roztažnosti**

Nejmenších hodnot součinitele teplotní roztažnosti se dosáhlo u materiálu 3 (40,0 dsk uhlíková vlákna). Příčinou jsou uhlíková vlákna, která mají sami o sobě nízkou hodnotu teplotní roztažnosti. Nejvyšších hodnot součinitele teplotní roztažnosti se dosáhlo u materiálů, která nemají plniva. Proto nejhůře dopadly materiály 1, 2 a 3.

#### **7. Zanesení kotouče**

Při broušení za sucha dochází k velkému zanesení pórů brousicího kotouče. Zanesení má vliv na drsnost povrchu materiálů, protože způsobuje vyhlazení kotouče. Z obrázků 37.1 - 37.12 nelze jednoznačně určit, zda větší či menší podíl dsk rýžových slupek způsobuje větší nebo menší zanesení brousicího kotouče.

Při broušení s procesní kapalinou není vidět významný rozdíl v zanesení kotouče mezi jednotlivými broušenými materiály, protože procesní kapalina má dobrý

vyplachovací účinek a nezanechává broušený materiál mezi póry broušicího kotouče.

Kompletní naměřená data předkládané diplomové práce jsou shrnuty v tabulkách 32.1 - 32.5. U každého parametru je zeleně vyznačen výsledek, který dopadl nejlépe. Naopak červeně je označen výsledek, který dopadl nejhůře.

Tabulka 32.1 Shrnutí všech výsledků

Materiál	Drsnost povrchu - za sucha, úběr 0,02 mm				Drsnost povrchu - procesní kapalina, úběr 0,02 mm				Drsnost povrchu - za sucha, úběr 1 mm				Drsnost povrchu - procesní kapalina, úběr 1 mm			
	Ra [μm]	Rz [μm]	Rt [μm]		Ra [μm]	Rz [μm]	Rt [μm]		Ra [μm]	Rz [μm]	Rt [μm]		Ra [μm]	Rz [μm]	Rt [μm]	
1	1,016 ± 0,017	6,990 ± 0,081	9,806 ± 0,096		1,001 ± 0,034	5,779 ± 0,241	7,345 ± 0,156		0,565 ± 0,028	4,247 ± 0,135	6,714 ± 0,312		0,512 ± 0,015	4,034 ± 0,149	6,839 ± 0,269	
2	0,961 ± 0,034	6,367 ± 0,318	10,192 ± 0,758		1,060 ± 0,033	6,520 ± 0,069	8,468 ± 0,096		1,038 ± 0,032	6,290 ± 0,161	9,449 ± 0,316		0,569 ± 0,036	5,384 ± 0,092	11,407 ± 1,172	
3	1,599 ± 0,076	11,036 ± 1,021	18,643 ± 2,267		1,069 ± 0,083	7,817 ± 0,898	13,197 ± 2,439		0,680 ± 0,036	6,232 ± 0,126	11,038 ± 1,163		0,513 ± 0,027	4,849 ± 0,087	9,552 ± 0,974	
4	1,047 ± 0,009	6,164 ± 0,158	7,409 ± 0,172		1,010 ± 0,043	6,094 ± 0,077	7,665 ± 0,334		0,657 ± 0,029	5,364 ± 0,215	9,109 ± 0,231		0,488 ± 0,019	4,859 ± 0,185	8,279 ± 0,213	
5	0,949 ± 0,035	6,604 ± 0,126	9,854 ± 0,208		1,027 ± 0,037	6,468 ± 0,410	8,542 ± 0,457		0,805 ± 0,029	5,233 ± 0,187	7,726 ± 0,293		0,635 ± 0,035	5,819 ± 0,137	11,273 ± 1,147	
6	0,853 ± 0,045	5,865 ± 0,237	8,309 ± 0,577		1,053 ± 0,040	6,361 ± 0,203	8,107 ± 0,287		0,881 ± 0,020	6,551 ± 0,146	12,120 ± 1,798		0,538 ± 0,022	3,917 ± 0,170	6,063 ± 0,128	
7	0,912 ± 0,022	5,859 ± 0,162	8,006 ± 0,311		1,048 ± 0,022	6,546 ± 0,360	8,260 ± 0,242		0,851 ± 0,016	5,579 ± 0,181	7,939 ± 0,390		0,595 ± 0,019	5,471 ± 0,135	9,651 ± 0,699	
8	1,253 ± 0,058	8,431 ± 0,202	13,176 ± 0,579		1,038 ± 0,057	6,408 ± 0,329	8,421 ± 0,548		0,668 ± 0,025	5,125 ± 0,196	11,120 ± 1,366		0,630 ± 0,020	5,645 ± 0,148	9,878 ± 0,559	
9	1,042 ± 0,016	6,749 ± 0,217	9,368 ± 0,552		0,955 ± 0,039	6,038 ± 0,136	7,598 ± 0,189		0,551 ± 0,022	5,054 ± 0,121	9,390 ± 0,136		0,547 ± 0,028	5,253 ± 0,213	9,255 ± 0,982	
10	1,112 ± 0,049	7,577 ± 0,142	11,005 ± 0,630		1,043 ± 0,045	6,284 ± 0,217	8,593 ± 1,043		0,827 ± 0,046	6,943 ± 0,232	16,402 ± 1,127		0,756 ± 0,028	7,387 ± 0,133	13,002 ± 1,072	
11	1,146 ± 0,027	8,515 ± 0,084	16,970 ± 0,760		1,038 ± 0,058	7,011 ± 0,554	11,577 ± 2,375		0,770 ± 0,023	6,205 ± 0,115	11,826 ± 0,839		0,489 ± 0,018	4,722 ± 0,331	8,222 ± 0,457	
12	1,314 ± 0,117	10,941 ± 1,397	20,775 ± 2,653		1,109 ± 0,155	7,690 ± 1,119	12,332 ± 2,634		1,136 ± 0,034	9,850 ± 0,211	18,620 ± 2,283		0,724 ± 0,014	4,834 ± 0,171	6,425 ± 0,446	

Tabulka 32.2 Shrnutí všech výsledků

Materiál	Rozměrová přesnost - za sucha, úběr 0,02 mm					Rozměrová přesnost - procesní kapalina, úběr 0,02 mm				
	Po broušení [mm]	24 hodin [mm]	Týden [mm]	4 týdny [mm]	6 týdnů [mm]	Po broušení [mm]	24 hodin [mm]	Týden [mm]	4 týdny [mm]	6 týdnů [mm]
1	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,994 ± 0,001	19,996 ± 0,001	20,000 ± 0,000	19,997 ± 0,001	19,999 ± 0,000	19,999 ± 0,001	20,000 ± 0,001
2	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,001	19,997 ± 0,001	19,999 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001	19,997 ± 0,001	19,994 ± 0,001	19,997 ± 0,001
3	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,999 ± 0,001	19,994 ± 0,001	19,996 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,997 ± 0,001	19,999 ± 0,001	19,996 ± 0,001	20,000 ± 0,000
4	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,995 ± 0,000	19,998 ± 0,000	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,000	20,001 ± 0,000
5	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,995 ± 0,000	20,000 ± 0,001	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,998 ± 0,001	19,994 ± 0,001	19,996 ± 0,000
6	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,997 ± 0,001	19,997 ± 0,001	19,998 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,995 ± 0,001	19,997 ± 0,000
7	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,997 ± 0,000	19,998 ± 0,000	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,998 ± 0,001	20,000 ± 0,000
8	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,994 ± 0,001	19,994 ± 0,001	19,996 ± 0,000	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,001	20,000 ± 0,000	20,002 ± 0,001
9	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,999 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001	20,001 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,999 ± 0,000
10	20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,001	19,999 ± 0,000	19,998 ± 0,000	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,996 ± 0,001	19,999 ± 0,001
11	20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,000	19,997 ± 0,000	19,997 ± 0,001	19,999 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,997 ± 0,000
12	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,997 ± 0,000	20,000 ± 0,001	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,001	19,998 ± 0,000	19,996 ± 0,000	19,995 ± 0,000

Tabulka 32.3 Shrnutí všech výsledků

Materiál	Rozměrová přesnost - za sucha, úběr 1 mm				Rozměrová přesnost - procesní kapalina, úběr 1 mm				Smluvní řezná síla	
	Po broušení [mm]	24 hodin [mm]	Týden [mm]		Po broušení [mm]	24 hodin [mm]	Týden [mm]		Za sucha [N]	Procesní kapalina [N]
1	20,000 ± 0,000	19,993 ± 0,000	19,997 ± 0,000		20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,000	20,000 ± 0,001		19,330 ± 0,250	25,000 ± 0,320
2	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001	19,996 ± 0,001		20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,000	19,999 ± 0,000		15,550 ± 0,360	22,280 ± 0,370
3	20,000 ± 0,000	19,994 ± 0,001	19,994 ± 0,001		20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,000	19,998 ± 0,001		40,220 ± 0,860	32,180 ± 0,320
4	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	20,002 ± 0,000		20,000 ± 0,000	20,004 ± 0,001	20,002 ± 0,000		21,510 ± 0,890	23,210 ± 0,420
5	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001		20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	20,000 ± 0,000		19,040 ± 0,400	22,540 ± 0,480
6	20,000 ± 0,000	19,997 ± 0,001	20,001 ± 0,001		20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,001	19,998 ± 0,000		21,970 ± 0,690	23,520 ± 0,420
7	20,000 ± 0,000	19,997 ± 0,000	19,999 ± 0,000		20,000 ± 0,000	20,002 ± 0,001	19,999 ± 0,001		18,690 ± 0,360	23,100 ± 0,350
8	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001	20,002 ± 0,000		20,000 ± 0,000	20,002 ± 0,000	19,999 ± 0,001		21,170 ± 0,360	26,100 ± 0,330
9	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	20,000 ± 0,000		20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001		21,490 ± 0,510	24,730 ± 0,570
10	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,999 ± 0,000		20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,000	19,999 ± 0,001		23,140 ± 0,260	23,550 ± 0,440
11	20,000 ± 0,000	19,997 ± 0,001	19,999 ± 0,001		20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,001	19,998 ± 0,000		21,120 ± 0,300	23,880 ± 0,370
12	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,998 ± 0,000		20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,001	19,998 ± 0,001		22,660 ± 0,560	28,590 ± 0,720



Tabulka 32.4 Shrnutí všech výsledků

Materiál	Maximální řezná síla		Mikrotvrdst		Teplota	
	Za sucha [N]	Procesní kapalina [N]	Za sucha [HV]	Procesní kapalina [HV]	Za sucha [°C]	Procesní kapalina [°C]
1	81,270 ± 2,160	96,610 ± 2,330	17,100 ± 1,120	19,390 ± 0,860	22,830 ± 0,050	18,070 ± 0,020
2	66,010 ± 1,300	86,390 ± 1,490	17,640 ± 0,430	18,390 ± 1,380	22,970 ± 0,040	18,040 ± 0,020
3	155,300 ± 2,150	126,420 ± 1,550	21,460 ± 1,480	23,300 ± 0,960	24,920 ± 0,050	18,080 ± 0,020
4	93,600 ± 2,770	91,540 ± 3,010	20,700 ± 0,500	23,310 ± 1,210	21,710 ± 0,040	18,000 ± 0,030
5	82,490 ± 0,690	88,340 ± 2,070	19,350 ± 0,850	21,570 ± 1,190	23,130 ± 0,020	18,100 ± 0,030
6	94,700 ± 1,910	91,150 ± 1,770	20,700 ± 0,920	21,820 ± 1,040	22,060 ± 0,040	18,070 ± 0,020
7	83,140 ± 1,630	90,590 ± 1,290	20,370 ± 0,990	22,820 ± 0,930	23,010 ± 0,040	18,190 ± 0,020
8	88,130 ± 1,290	105,710 ± 2,180	17,330 ± 0,500	22,910 ± 0,570	22,170 ± 0,040	18,020 ± 0,020
9	88,570 ± 1,040	93,090 ± 1,200	18,830 ± 0,850	20,540 ± 0,410	21,180 ± 0,020	18,020 ± 0,020
10	92,630 ± 3,090	90,800 ± 1,230	21,200 ± 1,080	21,310 ± 0,460	21,510 ± 0,040	18,160 ± 0,020
11	90,350 ± 1,810	91,390 ± 2,800	21,450 ± 0,940	25,400 ± 0,590	22,040 ± 0,040	19,050 ± 0,030
12	92,210 ± 1,780	112,000 ± 1,710	24,410 ± 0,610	23,990 ± 0,750	22,510 ± 0,020	18,040 ± 0,020

Tabulka 32.5 Shrnutí všech výsledků

Materiál	Součinitel teplotní roztažnosti - po obvodu		Součinitel teplotní roztažnosti - po tloušťce	
	Za sucha [K <sup>-1</sup> ]	Procesní kapalina [K <sup>-1</sup> ]	Za sucha [K <sup>-1</sup> ]	Procesní kapalina [K <sup>-1</sup> ]
1	57,072 ± 0,155	56,341 ± 0,063	55,389 ± 0,150	57,253 ± 0,086
2	56,187 ± 0,158	57,657 ± 0,139	53,893 ± 0,215	58,446 ± 0,262
3	18,338 ± 0,356	19,252 ± 0,088	20,230 ± 0,074	20,873 ± 0,168
4	53,392 ± 0,383	54,146 ± 0,217	53,130 ± 0,187	54,942 ± 0,219
5	49,805 ± 0,201	50,237 ± 0,194	49,231 ± 0,112	50,837 ± 0,129
6	49,623 ± 0,179	49,871 ± 0,200	48,888 ± 0,164	50,224 ± 0,139
7	48,059 ± 0,088	47,822 ± 0,206	48,586 ± 0,295	48,236 ± 0,166
8	45,719 ± 0,105	46,166 ± 0,216	45,990 ± 0,114	45,914 ± 0,199
9	44,005 ± 0,139	43,812 ± 0,247	44,839 ± 0,192	43,217 ± 0,143
10	42,349 ± 0,117	42,554 ± 0,125	42,764 ± 0,145	43,139 ± 0,158
11	39,538 ± 0,268	40,099 ± 0,155	40,268 ± 0,155	40,465 ± 0,205
12	37,449 ± 0,185	36,870 ± 0,221	38,100 ± 0,180	37,136 ± 0,138

Z tabulek 32.1 - 32.5 vyplývá následující:

- Při porovnání všech výsledků má množství plniva na měřené parametry různý vliv.
- Větší množství plniva má pozitivní vliv na rozměrovou přesnost, mikrotvrdost a součinitel teplotní roztažnosti.
- Naopak vzorky bez plniva měly pozitivní vliv na řeznou sílu.
- U drsnosti povrchu a teploty nelze jednoznačně rozhodnout, zda množství plniva má vliv na výsledné hodnoty.
- Ze všech výsledných hodnot dopadl nejlépe materiál 9 (5,0 dsk namlteých rýžových slupek).
- Naopak nejhůře dopadl materiál 3 (40,0 dsk uhlíková vlákna).

## 5. Závěr

Předložená diplomová práce zpracovává téma "**Chování kompozitních materiálů různého materiálového složení na bázi reaktoplastů při vybraných technologiích obrábění**". Práce má charakter výzkumu zaměřeného na kompozitní materiály na bázi licí epoxidové pryskyřice s různými plnivy a jejich obrobení.

Práce je rozdělena do dvou hlavních částí.

V teoretické části byla hlavní pozornost věnována reaktoplastům, resp. epoxidové pryskyřici a technologii broušení.

Experimentální část byla rozdělena na dvě oblasti - metodika experimentu a realizace experimentu. Metodika experimentu se zaměřila na volbu použitých materiálů, metodiku experimentu, popis stroje, nástroje, měřicích přístrojů a měřených parametrů. Realizace experimentu popisuje výsledky měření, jejich analýzu včetně hodnocení.

Z naměřených a vypočítaných výsledků lze formulovat následující:

Větší zanesení brousicího kotouče zlepší **drsnost povrchu**. Při použití delší doby procesní kapaliny má kapalina větší mazací účinek, čímž se dosáhne menší (lepší) drsnosti povrchu. Čím větší podíl plniva (uhlíková vlákna, namleté rýžové slupky), tím se dosáhne větší abrazivity povrchu. Ta má za následek zhoršení (zvětšení) drsnosti. Nejlepších výsledků dosáhly materiály 6 (0,5 dsk namletých rýžových slupek) a 7 (1,0 dsk namletých rýžových slupek). Naopak nejhorších výsledků dosáhl materiál 3 (40,0 dsk uhlíková vlákna).

U **rozměrové přesnosti** (stability) je důležitá tepelná roztažnost, která je u kompozitních materiálů několikanásobně větší oproti kovovým materiálům (hodnota tepelné roztažnosti kompozitu klesá s rostoucím obsahem plniva). Ta způsobuje poměrně velkou změnu (zmenšení) rozměrů po procesu broušení. Naopak při delším použití procesní kapaliny během broušení dochází k nasákavosti materiálů, čímž dochází ke zvětšení rozměru. Větší množství rýžových slupek má za následek lepší rozměrovou stabilitu, proto nejlépe dopadly materiály 9 (5,0 dsk namletých rýžových slupek), 10 (10,0 dsk namletých rýžových slupek), 11 (20,0 dsk namletých rýžových slupek) a 12 (50,0 dsk namletých rýžových slupek). Naopak nejhůře dopadl materiál 1 (bez plniva).

Kromě materiálu 3 se ve všech případech dosáhlo větší smluvní **řezné síly** při broušení s procesní kapalinou. To je zapříčiněno vznikem menších teplot během broušení a materiál klade větší odpor. Čím více množství rýžových slupek, tím vznikají větší smluvní a maximální řezné síly. Proto nejmenších sil se dosáhlo u materiálů 1 (bez plniva) a 2 (bez plniva). Největších řezných sil se dosáhlo u materiálu 3 (40,0 dsk uhlíková vlákna). U kompozitních materiálů vznikají během broušení menší řezné síly, než u broušení kovů. Tím se snižuje i potřebný příkon obráběcího stroje.

Větší **mikrotvrdosti** materiálů se dosáhlo po broušení s procesní kapalinou. Zároveň čím větší množství rýžových slupek, tím je větší mikrotvrdost. Proto nejlépe dopadly materiály 11 (20,0 dsk namletých rýžových slupek) a 12 (50,0 dsk namletých rýžových slupek). Naopak nejmenších mikrotvrdostí se dosáhlo u materiálů, která neobsahovala žádná plniva. Jedná se o materiály 1 a 2.

Nejvyšších **teplot** se dosáhlo po broušení za sucha u materiálu 3 (40dsk uhlíková vlákna). To je způsobeno použitím uhlíkových vláken, která se rychleji zahřejí než rýžové slupky nebo materiály bez plniva. U ostatních materiálů byla teplota ihned po broušení za sucha podobná. Při broušení s procesní kapalinou byla teplota u všech materiálů přibližně stejná.

Čím více plniva (uhlíková vlákna, namleté rýžové slupky) se použije, tím **součinitel teplotní roztažnosti** klesá. Součinitel teplotní roztažnosti má vliv na rozměrovou stabilitu. Proto materiály s větším množstvím plniva (namletých rýžových slupek) měly větší rozměrovou stabilitu. Nejlépe dopadl materiál 3 (40,0 dsk uhlíková vlákna). Důvodem jsou uhlíková vlákna, která mají sami o sobě nízký součinitel teplotní roztažnosti. Broušení bez nebo s procesní kapalinou nemá vliv na velikost součinitele teplotní roztažnosti.

Při broušení za sucha dochází k velkému **zanesení** pórů broušícího kotouče. Zanesení má vliv na drsnost povrchu materiálů, protože způsobuje vyhlazení kotouče. Při broušení s procesní kapalinou není vidět významný rozdíl v zanesení kotouče mezi jednotlivými broušenými materiály, protože procesní kapalina má dobrý vyplachovací účinek a nezanechává broušený materiál mezi póry broušícího kotouče.

Práce souvisí s výzkumnými záměry paní doc. Ing. Štěpánky Dvořákové, Ph.D a paní doc. Ing. Dory Kroisové, Ph.D se společností MESING, spol. s r.o. Společnost MESING, spol. s r.o. je česká firma, která se specializuje hlavně na za-

kázkové délkové měřicí zařízení a automatizační techniku. Zákazníkům dodává dílenská měřidla, kontrolní přípravky, měřicí stanice, plně automatické kontrolní stanice a linky.

Výsledky získané v této práci poslouží pro připravený vědecko-výzkumný projekt. Cílem je vývoj měřidel na bázi kompozitních materiálů s polymerní matricí a jejich zavedení do technické praxe. Měřidla z kompozitního materiálu budou sloužit jako levná měřidla s časově omezenou délkou použití oproti standardně používaným ocelovým měřidlům s charakteristickými parametry. Kompozitní měřidla budou navržena přímo podle požadavků společnosti MESING, spol. s r.o.

**Novost** spočívá ve vývoji kompozitního materiálu, který by sloužil pro výrobu kompozitních měřidel. Ta by nahradila ocelová měřidla, která se nyní v praxi používají. Kompozitní měřidla se v praxi nepoužívají a mohla by nahradit ocelová měřidla, především kvůli pořizovací ceně. Po úspěšném ověření optimalizovaných materiálových složení kompozitních měřidel, specifikace doby a charakteristických podmínek jejich používání lze očekávat rozšíření těchto nových kompozitních měřidel nejen za hranice partnerského průmyslového podniku, ale i za hranice České republiky.



*Obrázek 41 Použití kompozitního měřidla v praxi (konec komparátoru)*

## ZDROJE

- [1] TRČKA, R. Obrábění součástí z kompozitního materiálu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 38 s a 3 s přílohy. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Kalivoda.
- [2] BÍLEK O., *Výkonné broušení kovů a plastů*, Vysoké učení technické v Brně - VUT Brno, 2008. 29 s. ISBN 978-80-214-3681-7.
- [3] FIALA, Z. *Analýza měrných řezných sil pro nové obráběné materiály a CNC technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 125 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [4] JANDA R., *Obrábění kovů a plastů za nízkých teplot*, Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2012. 87 s.
- [5] MACHALOVÁ, Veronika. *Rezné síly při frézování vláknově vyztužených kompozitu*: Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 67 s., 4 přílohy. Vedoucí práce doc. Ing. Anton Humár CSc.
- [6] MAKAROV M., *Broušení neobvyklých strojírenských materiálů*, Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení v Praze, Fakulta strojní, Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2015. 42 s.
- [7] SEDLÁČEK, J. *Efektivní obrábění vláknově vyztužených kompozitních materiálů*, Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2010. 104 s, 7 příloh. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Anton HUMÁR, CSc.
- [8] ONLINE [2017-2-1] Dostupné z: [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/ze-zivota-vyzkumneho-centra/cesty-ke-zvyseni-efektivnosti-obrabecich-stroju\\_36427.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/ze-zivota-vyzkumneho-centra/cesty-ke-zvyseni-efektivnosti-obrabecich-stroju_36427.html)
- [9] LIDAŘÍK M., KINCL J., ROTH V., BRING A., *Epoxidové pryskyřice. Druhé, doplněné vydání*. SNTL, 1961, Praha, Bratislava.
- [10] LIDAŘÍK M., *Epoxidové pryskyřice. Třetí, přepracované a rozšířené vydání*. SNTL, 1983, Praha.
- [11] BENEŠ M., *Kinetika vytvrzování epoxidových pryskyřic*. Bakalářská práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2005. 35 s.
- [12] HORSKÁ, P. Příprava polymerních kompozitů: skleněné vlákno/polyesterová pryskyřice. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2009. 40 s. Vedoucí bakalářské práce prof. RNDr. Vladimír Čech, Ph.D.

- [13] VYMAZAL J., *Vliv orientace výztuže na mechanické vlastnosti vybraných kompozitních materiálů*. Bakalářská práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2011. 72 s.
- [14] ONLINE [2017-2-15] Dostupné z: <http://www.alteco.cz/cs/p/alteco-3-ton-epoxy-568-g-8888299802053.html>
- [15] ONLINE [2017-2-20] Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/problemy-pri-obrabeni-kompozitnich-materialu.html>
- [16] HUMÁR, A. Obrábění vláknově vyztužených kompozitů: Machining fibre reinforced composites : teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru strojírenská technologie. Brno: VUTIUM, 2004. 26 s. ISBN 80-214-2740-x.
- [17] ŘASA, J.; GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3. Metody, stroje a nástroje pro obrábění*, 2.vyd.; Scientia: Praha, 2005. ISBN 80-7183-337-1
- [18] HU, N. S., ZHANG, L., C., *Some observations in grinding unidirectional carbon fibre reinforced plastic*, N.S. Hu, L.C. Zhang, Some observations in grinding unidirectional carbon fibre-reinforced plastics, Journal of Materials Processing Technology, Volume 152, Issue 3, 30 October 2004, Pages 333-338, ISSN 0924-0136, (<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.374>.)  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013604007514>)
- [19] KROISOVÁ D., *Vnitřní tlumení v kompozitních materiálech*, Autoreferát k habilitační práci. Liberec, 2009. 24 s. ISBN 978-80-7372-473-3.
- [20] ONLINE [2017-3-28] Dostupné z: <http://www.svar-tech.cz/brusny-kotouc-keramicky-o350x50x127mm-98a-46k-ruzovy>
- [21] ONLINE [2017-4-4] Dostupné z: <https://www.hanyko-praha.cz/produkty/tvrdomery/co-je-tvrdost-a-jak-se-meri/>
- [22] JERSÁK J., *Přednášky k předmětu: Abrasivní a nekonvenční metody obrábění*. Navazující magisterské studium - strojírenská technologie a materiály, obor: Obrábění a montáž, 1. ročník.
- [23] Technická univerzita v Liberci, *Materiálový list - ChS Epoxy 520 plněná organicko-anorganickým plnivem*. ONLINE [4-27-2017] Dostupné z: [http://cxi.tul.cz/projekty-vav/Preseed\\_ENVITECH.html](http://cxi.tul.cz/projekty-vav/Preseed_ENVITECH.html)
- [24] Kroisová D., *Vnitřní tlumení v kompozitních materiálech*, Habilitační práce. Liberec, 2009. 116 s.



[25 ] *MATERIÁLOVÝ LIST – CHS-EPOXY 520 plněné organicko-anorganickým plnivem*, [ONLINE] [ 2017-01-12]. Dostupné z:  
[https://www.hf.tul.cz/upload/vyrzpravy/01\\_materialovy\\_list.pdf](https://www.hf.tul.cz/upload/vyrzpravy/01_materialovy_list.pdf)

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Mechanismus vzniku třísky [7] .....	17
Obrázek 2	Delaminace při vstupu vrtáku do materiálu [7] .....	18
Obrázek 3	Delaminace při výstupu vrtáku z materiálu [7] .....	18
Obrázek 4	Opatřebený nástroj s drážky s vrstvou zrn z PKD [1].....	21
Obrázek 5	Ukázka broušícího kotouče [22] .....	22
Obrázek 6	Značení broušícího kotouče [22] .....	24
Obrázek 7	Tepelná bilance procesu broušení [22] .....	25
Obrázek 8	Závislost horizontální (a) a vertikální (b) brusné síly .....	26
	na úhlu orientace vláken pro různé hloubky řezu [6] .....	26
Obrázek 9	Závislost podélné (a) a příčné (b) drsnosti na úhlu orientace vláken [6] ..	27
Obrázek 10	Slupky, organicko-anorganické plnivo v surovém stavu a jako namleté plnivo [25] .....	30
Obrázek 11	Přilepený vzorek na ocelovou kostku .....	33
Obrázek 12	Dvousložkové lepidlo Alteco 3-ton quick epoxy adhesive .....	33
Obrázek 13	Čerpadlo pro přívod chladicí kapaliny .....	35
Obrázek 14	Stroj bruska BPH 320 A .....	36
Obrázek 15	Broušící kotouč pro realizaci experimentu [20] .....	37
Obrázek 16	Jednokamenový diamantový orovnávač .....	37
Obrázek 17	Laboratorní profiloměr MITUTOYO .....	38
Obrázek 18	Digitální mikrometr Mitutoyo .....	39
Obrázek 19	Piezoelektrický dynamometr KISTLER 9265 B .....	39
Obrázek 20	Nábojový zesilovač 5019 B .....	40
Obrázek 21	Ochrana dynamometru před procesní kapalinou .....	40
Obrázek 22	Digitální multimetr METEX M 3890D s připojením teplotní sondy .....	41
Obrázek 23	Teplotní sonda pro měření teploty .....	41
Obrázek 24	Datalogger pro měření teploty a vlhkosti CEM DT-172 .....	42
Obrázek 25	Tvrdoměr Micromet 2100 Series Microhardness Testers .....	43
Obrázek 26	Ruční refraktometr .....	43
Obrázek 27	Místa pro měření drsnosti povrchu .....	44
Obrázek 28	Vzorový výstup z programu Surfpak při technologii broušení .....	45
Obrázek 29	Místa pro měření rozměrové přesnosti .....	45
Obrázek 30	Vzorový průběh kolmé síly při operaci broušení .....	46

Obrázek 31	Vzorový průběh všech parametrů při technologii broušení , které je dynamometr schopen vyhodnotit.....	47
Obrázek 32	Vzorový průběh vyhodnocení smluvní řezné síly z jednotlivého píku ...	48
Obrázek 33	Vytvoření vpichu ve vzorku [21] .....	48
Obrázek 34	Místa pro měření tvrdosti podle Vickerse .....	49
Obrázek 35	Digitální úchylkoměr ABSOLUTE DIGIMATIC ID-S .....	50
Obrázek 36	Ustavení digitálního úchylkoměru do stojánu .....	50
Obrázek 37.1	Měření odchytky po obvodu vzorku .....	49
Obrázek 37.2	Měření odchytky po obvodu vzorku.....	49
Obrázek 38	Orovnaný kotouč jednokamenovým diamantovým morovnáčem. ....	76
Obrázek 39.1	Zanesený kotouč po broušení za sucha materiálu č.1.....	76
Obrázek 39.2	Zanesený kotouč po broušení za sucha materiálu č.2.....	76
Obrázek 39.3	Zanesený kotouč po broušení za sucha materiálu č.3.....	76
Obrázek 39.4	Zanesený kotouč po broušení za sucha materiálu č.4.....	76
Obrázek 39.5	Zanesený kotouč po broušení za sucha materiálu č.5.....	77
Obrázek 39.6	Zanesený kotouč po broušení za sucha materiálu č.6.....	77
Obrázek 39.7	Zanesený kotouč po broušení za sucha materiálu č.7.....	77
Obrázek 39.8	Zanesený kotouč po broušení za sucha materiálu č.8.....	77
Obrázek 39.9	Zanesený kotouč po broušení za sucha materiálu č.9.....	77
Obrázek 39.10	Zanesený kotouč po broušení za sucha materiálu č.10.....	77
Obrázek 39.11	Zanesený kotouč po broušení za sucha materiálu č.11.....	78
Obrázek 39.12	Zanesený kotouč po broušení za sucha materiálu č.12.....	78
Obrázek 40.1	Zanesený kotouč po broušení s procesní kap. mat. č.1.....	78
Obrázek 40.2	Zanesený kotouč po broušení s procesní kap. mat. č.2.....	78
Obrázek 40.3	Zanesený kotouč po broušení s procesní kap. mat. č.3.....	78
Obrázek 40.4	Zanesený kotouč po broušení s procesní kap. mat. č.4.....	78
Obrázek 40.5	Zanesený kotouč po broušení s procesní kap. mat. č.5.....	79
Obrázek 40.6	Zanesený kotouč po broušení s procesní kap. mat. č.6.....	79
Obrázek 40.7	Zanesený kotouč po broušení s procesní kap. mat. č.7.....	79
Obrázek 40.8	Zanesený kotouč po broušení s procesní kap. mat. č.8.....	79
Obrázek 40.9	Zanesený kotouč po broušení s procesní kap. mat. č.9.....	79
Obrázek 40.10	Zanesený kotouč po broušení s procesní kap. mat. č.10.....	79
Obrázek 40.11	Zanesený kotouč po broušení s procesní kap. mat. č.11.....	80

Obrázek 40.12 Zanesený kotouč po broušení s procesní kap. mat. č.12.....	80
Obrázek 41 Použití kompozitního měřidla v praxi (konec komparátoru) .....	94

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Přehled vybraných vlastností epoxidové pryskyřice [12].....	11
Tabulka 2	Vybrané vlastnosti kovových materiálů ve srovnání ..... s vlastnostmi laminátů [10] .....	12
Tabulka 3	Hodnoty meze únavy při zatížení $10^6$ cyklů za sekundu (v % původní hodnoty) různých materiálů .....	12
Tabulka 4	Typické vlastnosti skleněných vláken při normální teplotě [5].....	14
Tabulka 5	Vlastnosti uhlíkových vláken [5].....	15
Tabulka 6	Přehled umělých brusiv [22] .....	22
Tabulka 7	Vlastnosti epoxidové pryskyřice ChS Epoxy 520 .....	29
Tabulka 8	Vlastnosti epoxidové pryskyřice ChS Epoxy 521 .....	29
Tabulka 9	Použité vzorky pro experiment .....	32
Tabulka 10	Základní parametry experimentu .....	34
Tabulka 11	Řezné podmínky pro realizaci experimentu .....	34
Tabulka 12	Technické parametry procesní kapaliny Grindex 10 .....	35
Tabulka 13	Základní technické údaje brusky BPH 320 A .....	36
Tabulka 14	Drsnost povrchu při broušení za sucha - úběr 0,02 mm .....	53
Tabulka 15	Drsnost povrchu při broušení s procesní kapalinou - úběr 0,02 mm.....	54
Tabulka 16	Drsnost povrchu při broušení za sucha - úběr 1 mm .....	55
Tabulka 17	Drsnost povrchu při broušení s procesní kapalinou - úběr 1 mm.....	56
Tabulka 18	Rozměrová přesnost po broušení za sucha - úběr 0,02 mm .....	58
Tabulka 19	Rozměrová přesnost po broušení s použitím procesní kapaliny - úběr 0,02 mm .....	59
Tabulka 20	Rozměrová přesnost po broušení za sucha - úběr 1 mm .....	60
Tabulka 21	Rozměrová přesnost po broušení s použitím procesní kapaliny - úběr 1 mm .....	62
Tabulka 22	Výsledné hodnoty smluvní řezné síly.....	64
Tabulka 23	Výsledné hodnoty maximální řezné síly.....	65
Tabulka 24	Mikrotvrdost vzorků při broušení za sucha i s procesní kapalinou .....	67
Tabulka 25	Teploty vzorku při broušení .....	69
Tabulka 26	Rozdíly teplot před a během broušení .....	70
Tabulka 27	Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha \mu mm \cdot ^\circ C$ .....	72
Tabulka 28	Odchyłky rozměrů pro různé teploty - broušení za sucha, po obvodu ...	74

Tabulka 29	Odchyly rozměrů pro různé teploty - broušení s proces.kap., po obv. .	74
Tabulka 30	Odchyly rozměrů pro různé teploty - broušení za sucha, po tloušťce ..	75
Tabulka 31	Odchyly rozměrů pro různé teploty - broušení s proces.kap., po tl. ....	75
Tabulka 32.1	Shrnutí všech výsledků .....	86
Tabulka 32.2	Shrnutí všech výsledků .....	87
Tabulka 32.3	Shrnutí všech výsledků .....	88
Tabulka 32.4	Shrnutí všech výsledků .....	89
Tabulka 32.5	Shrnutí všech výsledků .....	90

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Porovnání drsnosti povrchu po broušení - úběr 0,02 mm.....	55
Graf 2 Porovnání drsnosti povrchu pro broušení - úběr 1 mm.....	57
Graf 3 Porovnání rozměrové přesnosti při broušení za sucha - úběr 0,02 mm .....	58
Graf 4 Porovnání rozměrové přesnosti při broušení s procesní kapalinou - úběr 0,02 mm .....	60
Graf 5 Porovnání rozměrové přesnosti při broušení za sucha - úběr 1 mm .....	61
Graf 6 Porovnání rozměrové přesnosti při broušení s procesní kapalinou - úběr 1 mm .....	62
Graf 7 Porovnání smluvní řezné síly .....	64
Graf 8 Porovnání maximální řezná síla .....	66
Graf 9 Porovnání mikrotvrdosti jednotlivých materiálů .....	68
Graf 10 Porovnání teplot materiálů po broušení.....	69
Graf 11 Porovnání rozdílu teplot před a po broušení.....	70
Graf 12 Porovnání součinitele teplotní roztažnosti vzorků po obvodu .....	72
Graf 13 Porovnání součinitele teplotní roztažnosti vzorků po tloušťce .....	73

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 - Drsnost povrchu.....	105
Příloha 2 - Rozměrová přesnost.....	113
Příloha 3 - Řezné síly .....	121
Příloha 4 - Mikrotvrdost .....	125
Příloha 5 - Teplota při broušení .....	127
Příloha 6 - Součinitel teplotní roztažnosti .....	129



## Příloha 1 - Drsnost povrchu

Drsnost povrchu při broušení za sucha a úběru 0,02 mm

Drsnost povrchu - za sucha				
Materiál		Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rt [ $\mu\text{m}$ ]
1	A	1,012 $\pm$ 0,068	6,993 $\pm$ 0,819	9,672 $\pm$ 1,559
	B	1,027 $\pm$ 0,051	6,994 $\pm$ 0,735	9,910 $\pm$ 2,131
	C	1,035 $\pm$ 0,061	7,015 $\pm$ 0,626	9,849 $\pm$ 1,123
	D	1,022 $\pm$ 0,047	6,849 $\pm$ 0,584	9,711 $\pm$ 1,418
	E	0,986 $\pm$ 0,089	7,101 $\pm$ 0,713	9,887 $\pm$ 0,998
	Arit. pr.	<b>1,016 <math>\pm</math> 0,017</b>	<b>6,990 <math>\pm</math> 0,081</b>	<b>9,806 <math>\pm</math> 0,096</b>
2	A	0,936 $\pm$ 0,171	5,957 $\pm$ 1,075	9,023 $\pm$ 3,939
	B	0,975 $\pm$ 0,149	6,618 $\pm$ 1,396	11,344 $\pm$ 5,291
	C	1,021 $\pm$ 0,112	6,334 $\pm$ 0,814	9,855 $\pm$ 3,258
	D	0,944 $\pm$ 0,089	6,107 $\pm$ 1,120	10,322 $\pm$ 3,149
	E	0,930 $\pm$ 0,102	6,819 $\pm$ 1,228	10,417 $\pm$ 2,281
	Arit. pr.	<b>0,961 <math>\pm</math> 0,034</b>	<b>6,367 <math>\pm</math> 0,318</b>	<b>10,192 <math>\pm</math> 0,758</b>
3	A	1,494 $\pm$ 0,246	9,560 $\pm$ 2,652	15,598 $\pm$ 8,829
	B	1,701 $\pm$ 0,328	12,428 $\pm$ 3,231	22,275 $\pm$ 7,707
	C	1,549 $\pm$ 0,187	10,429 $\pm$ 1,822	17,049 $\pm$ 5,523
	D	1,669 $\pm$ 0,259	11,873 $\pm$ 1,625	19,442 $\pm$ 4,871
	E	1,581 $\pm$ 0,098	10,888 $\pm$ 2,414	18,849 $\pm$ 3,334
	Arit. pr.	<b>1,599 <math>\pm</math> 0,076</b>	<b>11,036 <math>\pm</math> 1,021</b>	<b>18,643 <math>\pm</math> 2,267</b>
4	A	1,042 $\pm$ 0,044	6,139 $\pm$ 0,230	7,369 $\pm$ 0,632
	B	1,051 $\pm$ 0,070	6,208 $\pm$ 0,355	7,436 $\pm$ 0,762
	C	1,059 $\pm$ 0,062	5,879 $\pm$ 0,443	7,514 $\pm$ 0,552
	D	1,033 $\pm$ 0,091	6,347 $\pm$ 0,268	7,108 $\pm$ 0,792
	E	1,050 $\pm$ 0,065	6,249 $\pm$ 0,231	7,618 $\pm$ 0,690
	Arit. pr.	<b>1,047 <math>\pm</math> 0,009</b>	<b>6,164 <math>\pm</math> 0,158</b>	<b>7,409 <math>\pm</math> 0,172</b>
5	A	0,963 $\pm$ 0,072	6,675 $\pm$ 1,048	9,708 $\pm$ 2,411
	B	0,926 $\pm$ 0,096	6,506 $\pm$ 0,972	9,848 $\pm$ 3,068
	C	1,010 $\pm$ 0,104	6,427 $\pm$ 1,118	10,249 $\pm$ 1,676
	D	0,912 $\pm$ 0,064	6,785 $\pm$ 1,284	9,801 $\pm$ 1,323
	E	0,932 $\pm$ 0,088	6,628 $\pm$ 0,826	9,664 $\pm$ 2,210
	Arit. pr.	<b>0,949 <math>\pm</math> 0,035</b>	<b>6,604 <math>\pm</math> 0,126</b>	<b>9,854 <math>\pm</math> 0,208</b>
6	A	0,834 $\pm$ 0,099	5,888 $\pm$ 1,054	8,856 $\pm$ 2,381
	B	0,867 $\pm$ 0,063	5,870 $\pm$ 0,844	7,667 $\pm$ 1,402
	C	0,812 $\pm$ 0,082	6,015 $\pm$ 0,929	8,002 $\pm$ 0,982
	D	0,934 $\pm$ 0,112	5,429 $\pm$ 1,328	9,134 $\pm$ 2,004
	E	0,818 $\pm$ 0,072	6,123 $\pm$ 1,288	7,887 $\pm$ 1,874
	Arit. pr.	<b>0,853 <math>\pm</math> 0,045</b>	<b>5,865 <math>\pm</math> 0,237</b>	<b>8,309 <math>\pm</math> 0,577</b>

Drsnost povrchu - za sucha				
Materiál		Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rt [ $\mu\text{m}$ ]
7	A	0,886 $\pm$ 0,070	5,675 $\pm$ 0,255	7,581 $\pm$ 0,942
	B	0,940 $\pm$ 0,049	5,915 $\pm$ 0,464	8,426 $\pm$ 1,569
	C	0,908 $\pm$ 0,033	5,814 $\pm$ 0,133	8,024 $\pm$ 0,661
	D	0,934 $\pm$ 0,054	6,143 $\pm$ 0,392	7,751 $\pm$ 0,847
	E	0,891 $\pm$ 0,084	5,749 $\pm$ 0,422	8,25 $\pm$ 1,008
	Arit. pr.	0,912 $\pm$ 0,022	5,859 $\pm$ 0,162	8,006 $\pm$ 0,311
8	A	1,265 $\pm$ 0,115	8,525 $\pm$ 1,036	13,614 $\pm$ 2,640
	B	1,240 $\pm$ 0,162	8,328 $\pm$ 1,426	12,812 $\pm$ 3,439
	C	1,314 $\pm$ 0,128	8,104 $\pm$ 1,553	12,223 $\pm$ 1,861
	D	1,149 $\pm$ 0,212	8,499 $\pm$ 0,887	13,448 $\pm$ 1,438
	E	1,299 $\pm$ 0,084	8,701 $\pm$ 1,224	13,782 $\pm$ 1,678
	Arit. pr.	1,253 $\pm$ 0,058	8,431 $\pm$ 0,202	13,176 $\pm$ 0,579
9	A	1,031 $\pm$ 0,101	6,491 $\pm$ 0,946	8,778 $\pm$ 1,976
	B	1,051 $\pm$ 0,144	7,062 $\pm$ 0,860	9,800 $\pm$ 2,133
	C	1,037 $\pm$ 0,054	6,872 $\pm$ 0,725	9,129 $\pm$ 1,662
	D	1,068 $\pm$ 0,092	6,518 $\pm$ 1,045	10,221 $\pm$ 2,321
	E	1,024 $\pm$ 0,114	6,802 $\pm$ 0,625	8,914 $\pm$ 1,421
	Arit. pr.	1,042 $\pm$ 0,016	6,749 $\pm$ 0,217	9,368 $\pm$ 0,552
10	A	1,138 $\pm$ 0,088	7,652 $\pm$ 0,969	11,179 $\pm$ 2,447
	B	1,084 $\pm$ 0,110	7,509 $\pm$ 0,799	10,961 $\pm$ 2,508
	C	1,194 $\pm$ 0,102	7,814 $\pm$ 0,874	12,087 $\pm$ 3,078
	D	1,092 $\pm$ 0,065	7,409 $\pm$ 0,691	10,247 $\pm$ 1,749
	E	1,054 $\pm$ 0,121	7,502 $\pm$ 0,613	10,549 $\pm$ 2,881
	Arit. pr.	1,112 $\pm$ 0,049	7,577 $\pm$ 0,142	11,005 $\pm$ 0,630
11	A	1,160 $\pm$ 0,190	8,576 $\pm$ 1,896	17,494 $\pm$ 7,326
	B	1,132 $\pm$ 0,142	8,440 $\pm$ 1,572	16,337 $\pm$ 5,426
	C	1,187 $\pm$ 0,155	8,629 $\pm$ 1,102	16,024 $\pm$ 2,248
	D	1,108 $\pm$ 0,201	8,401 $\pm$ 1,385	18,114 $\pm$ 6,925
	E	1,142 $\pm$ 0,105	8,529 $\pm$ 0,898	16,881 $\pm$ 3,301
	Arit. pr.	1,146 $\pm$ 0,027	8,515 $\pm$ 0,084	16,970 $\pm$ 0,760
12	A	1,473 $\pm$ 0,275	12,939 $\pm$ 2,938	24,659 $\pm$ 5,985
	B	1,152 $\pm$ 0,245	8,959 $\pm$ 3,644	16,815 $\pm$ 8,578
	C	1,402 $\pm$ 0,182	10,214 $\pm$ 1,887	22,179 $\pm$ 4,174
	D	1,218 $\pm$ 0,167	12,025 $\pm$ 2,561	19,227 $\pm$ 3,542
	E	1,325 $\pm$ 0,089	10,569 $\pm$ 2,321	20,994 $\pm$ 2,957
	Arit. pr.	1,314 $\pm$ 0,117	10,941 $\pm$ 1,397	20,775 $\pm$ 2,653

**Drsnost povrchu při broušení s procesní kapalinou a úběru 0,02 mm**

<b>Drsnost povrchu - procesní kapalina</b>				
<b>Materiál</b>		<b>Ra [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Rz [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Rt [<math>\mu\text{m}</math>]</b>
<b>1</b>	A	$1,001 \pm 0,105$	$5,902 \pm 0,818$	$7,353 \pm 1,004$
	B	$0,954 \pm 0,127$	$5,421 \pm 0,749$	$7,104 \pm 0,992$
	C	$0,975 \pm 0,114$	$6,128 \pm 0,923$	$7,449 \pm 1,122$
	D	$1,051 \pm 0,087$	$5,819 \pm 0,880$	$7,558 \pm 1,047$
	E	$1,022 \pm 0,071$	$5,627 \pm 0,651$	$7,261 \pm 0,891$
	<b>Arit. pr.</b>	<b><math>1,001 \pm 0,034</math></b>	<b><math>5,779 \pm 0,241</math></b>	<b><math>7,345 \pm 0,156</math></b>
<b>2</b>	A	$1,073 \pm 0,149$	$6,508 \pm 0,766$	$8,498 \pm 1,134$
	B	$1,048 \pm 0,091$	$6,578 \pm 0,666$	$8,497 \pm 0,776$
	C	$1,062 \pm 0,051$	$6,614 \pm 0,517$	$8,326 \pm 0,817$
	D	$1,108 \pm 0,113$	$6,418 \pm 0,690$	$8,408 \pm 0,920$
	E	$1,008 \pm 0,098$	$6,483 \pm 0,719$	$8,611 \pm 0,755$
	<b>Arit. pr.</b>	<b><math>1,060 \pm 0,033</math></b>	<b><math>6,520 \pm 0,069</math></b>	<b><math>8,468 \pm 0,096</math></b>
<b>3</b>	A	$1,173 \pm 0,286$	$8,958 \pm 2,822$	$16,637 \pm 7,522$
	B	$0,960 \pm 0,134$	$6,351 \pm 1,570$	$9,947 \pm 7,618$
	C	$1,079 \pm 0,155$	$8,108 \pm 1,889$	$13,429 \pm 5,236$
	D	$1,142 \pm 0,226$	$7,335 \pm 1,641$	$14,882 \pm 6,018$
	E	$0,991 \pm 0,187$	$8,334 \pm 2,148$	$11,089 \pm 6,472$
	<b>Arit. pr.</b>	<b><math>1,069 \pm 0,083</math></b>	<b><math>7,817 \pm 0,898</math></b>	<b><math>13,197 \pm 2,439</math></b>
<b>4</b>	A	$1,007 \pm 0,125$	$6,009 \pm 0,818$	$7,350 \pm 1,171$
	B	$1,003 \pm 0,174$	$6,114 \pm 0,782$	$7,958 \pm 0,604$
	C	$1,089 \pm 0,152$	$6,087 \pm 0,624$	$7,628 \pm 0,528$
	D	$0,962 \pm 0,104$	$6,229 \pm 0,751$	$8,124 \pm 1,239$
	E	$0,989 \pm 0,087$	$6,032 \pm 0,646$	$7,264 \pm 0,849$
	<b>Arit. pr.</b>	<b><math>1,010 \pm 0,043</math></b>	<b><math>6,094 \pm 0,077</math></b>	<b><math>7,665 \pm 0,334</math></b>
<b>5</b>	A	$1,087 \pm 0,130$	$6,708 \pm 0,680$	$9,192 \pm 1,635$
	B	$0,998 \pm 0,113$	$5,948 \pm 0,590$	$7,882 \pm 0,782$
	C	$1,025 \pm 0,048$	$7,128 \pm 0,648$	$8,426 \pm 0,641$
	D	$0,982 \pm 0,098$	$6,223 \pm 0,552$	$8,892 \pm 1,241$
	E	$1,044 \pm 0,067$	$6,335 \pm 0,417$	$8,318 \pm 0,921$
	<b>Arit. pr.</b>	<b><math>1,027 \pm 0,037</math></b>	<b><math>6,468 \pm 0,410</math></b>	<b><math>8,542 \pm 0,457</math></b>
<b>6</b>	A	$1,034 \pm 0,183$	$6,172 \pm 0,957$	$7,711 \pm 1,363$
	B	$1,061 \pm 0,183$	$6,486 \pm 0,786$	$8,352 \pm 0,555$
	C	$1,004 \pm 0,102$	$6,318 \pm 0,455$	$8,510 \pm 0,776$
	D	$1,125 \pm 0,162$	$6,685 \pm 0,588$	$7,947 \pm 1,121$
	E	$1,042 \pm 0,084$	$6,144 \pm 0,660$	$8,017 \pm 0,841$
	<b>Arit. pr.</b>	<b><math>1,053 \pm 0,040</math></b>	<b><math>6,361 \pm 0,203</math></b>	<b><math>8,107 \pm 0,287</math></b>

Drsnost povrchu - procesní kapalina				
Materiál		Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rt [ $\mu\text{m}$ ]
7	A	1,045 $\pm$ 0,259	6,381 $\pm$ 0,939	8,470 $\pm$ 1,713
	B	1,049 $\pm$ 0,095	6,501 $\pm$ 0,685	8,088 $\pm$ 1,105
	C	1,088 $\pm$ 0,110	5,987 $\pm$ 0,776	8,624 $\pm$ 1,882
	D	1,024 $\pm$ 0,083	6,848 $\pm$ 0,893	8,014 $\pm$ 1,252
	E	1,035 $\pm$ 0,071	7,011 $\pm$ 1,103	8,102 $\pm$ 1,414
	Arit. pr.	1,048 $\pm$ 0,022	6,546 $\pm$ 0,360	8,260 $\pm$ 0,242
8	A	1,001 $\pm$ 0,125	5,971 $\pm$ 0,973	7,640 $\pm$ 1,222
	B	1,054 $\pm$ 0,067	6,699 $\pm$ 0,631	9,170 $\pm$ 1,000
	C	0,974 $\pm$ 0,087	6,442 $\pm$ 0,741	8,104 $\pm$ 0,964
	D	1,140 $\pm$ 0,114	6,822 $\pm$ 0,888	8,888 $\pm$ 0,880
	E	1,020 $\pm$ 0,099	6,104 $\pm$ 0,797	8,304 $\pm$ 0,741
	Arit. pr.	1,038 $\pm$ 0,057	6,408 $\pm$ 0,329	8,421 $\pm$ 0,548
9	A	0,941 $\pm$ 0,183	5,930 $\pm$ 0,864	7,593 $\pm$ 0,974
	B	0,985 $\pm$ 0,073	6,148 $\pm$ 0,324	7,725 $\pm$ 0,442
	C	0,889 $\pm$ 0,092	6,210 $\pm$ 0,225	7,241 $\pm$ 0,674
	D	0,959 $\pm$ 0,044	5,841 $\pm$ 0,967	7,659 $\pm$ 0,388
	E	1,002 $\pm$ 0,120	6,059 $\pm$ 0,387	7,774 $\pm$ 0,488
	Arit. pr.	0,955 $\pm$ 0,039	6,038 $\pm$ 0,136	7,598 $\pm$ 0,189
10	A	1,054 $\pm$ 0,134	6,582 $\pm$ 1,114	10,248 $\pm$ 4,290
	B	1,015 $\pm$ 0,119	5,963 $\pm$ 0,960	7,432 $\pm$ 0,979
	C	1,127 $\pm$ 0,174	6,418 $\pm$ 0,674	9,284 $\pm$ 1,187
	D	1,011 $\pm$ 0,082	6,129 $\pm$ 0,772	7,709 $\pm$ 2,256
	E	1,008 $\pm$ 0,093	6,329 $\pm$ 0,514	8,294 $\pm$ 0,848
	Arit. pr.	1,043 $\pm$ 0,045	6,284 $\pm$ 0,217	8,593 $\pm$ 1,043
11	A	0,962 $\pm$ 0,137	6,134 $\pm$ 0,876	8,076 $\pm$ 1,465
	B	1,114 $\pm$ 0,188	7,798 $\pm$ 1,822	15,470 $\pm$ 6,581
	C	1,087 $\pm$ 0,081	6,741 $\pm$ 0,708	10,853 $\pm$ 1,333
	D	0,985 $\pm$ 0,121	7,249 $\pm$ 0,621	12,059 $\pm$ 2,241
	E	1,044 $\pm$ 0,074	7,134 $\pm$ 0,717	11,425 $\pm$ 1,874
	Arit. pr.	1,038 $\pm$ 0,058	7,011 $\pm$ 0,554	11,577 $\pm$ 2,375
12	A	0,923 $\pm$ 0,092	6,084 $\pm$ 0,877	8,236 $\pm$ 1,102
	B	1,264 $\pm$ 0,176	9,356 $\pm$ 1,982	16,154 $\pm$ 4,306
	C	1,215 $\pm$ 0,144	6,914 $\pm$ 0,724	12,857 $\pm$ 0,858
	D	1,225 $\pm$ 0,192	8,198 $\pm$ 0,922	13,429 $\pm$ 1,542
	E	0,918 $\pm$ 0,102	7,896 $\pm$ 0,666	10,982 $\pm$ 2,359
	Arit. pr.	1,109 $\pm$ 0,155	7,690 $\pm$ 1,119	12,332 $\pm$ 2,634

**Drsnost povrchu při broušení za sucha a úběru 1 mm**

<b>Drsnost povrchu - za sucha</b>				
<b>Materiál</b>		<b>Ra [μm]</b>	<b>Rz [μm]</b>	<b>Rt [μm]</b>
<b>1</b>	A	0,512 ± 0,078	4,384 ± 0,327	6,241 ± 1,542
	B	0,574 ± 0,052	4,118 ± 0,412	7,102 ± 1,826
	C	0,565 ± 0,061	4,244 ± 0,461	6,716 ± 1,208
	D	0,591 ± 0,69	4,078 ± 0,536	6,989 ± 0,982
	E	0,581 ± 0,041	4,410 ± 0,388	6,521 ± 1,424
	<b>Arit. pr.</b>	<b>0,565 ± 0,028</b>	<b>4,247 ± 0,135</b>	<b>6,714 ± 0,312</b>
<b>2</b>	A	1,022 ± 0,052	5,985 ± 0,948	8,844 ± 3,336
	B	1,079 ± 0,093	6,428 ± 0,864	9,661 ± 1,982
	C	1,040 ± 0,070	6,280 ± 0,706	9,466 ± 2,106
	D	0,986 ± 0,121	6,344 ± 0,830	9,725 ± 2,241
	E	1,062 ± 0,087	6,412 ± 0,910	9,551 ± 2,002
	<b>Arit. pr.</b>	<b>1,038 ± 0,032</b>	<b>6,290 ± 0,161</b>	<b>9,449 ± 0,316</b>
<b>3</b>	A	0,621 ± 0,182	6,419 ± 2,829	13,145 ± 5,201
	B	0,662 ± 0,112	6,117 ± 2,241	9,598 ± 4,987
	C	0,684 ± 0,146	6,230 ± 2,077	11,044 ± 4,281
	D	0,721 ± 0,172	6,078 ± 2,981	10,588 ± 3,356
	E	0,712 ± 0,204	6,318 ± 2,440	10,814 ± 3,549
	<b>Arit. pr.</b>	<b>0,680 ± 0,036</b>	<b>6,232 ± 0,126</b>	<b>11,038 ± 1,163</b>
<b>4</b>	A	0,621 ± 0,074	5,501 ± 0,959	9,241 ± 2,493
	B	0,677 ± 0,060	5,416 ± 0,714	9,419 ± 2,871
	C	0,657 ± 0,058	5,301 ± 0,857	9,023 ± 2,372
	D	0,701 ± 0,107	5,617 ± 1,105	9,134 ± 1,873
	E	0,631 ± 0,089	4,987 ± 0,923	8,729 ± 3,361
	<b>Arit. pr.</b>	<b>0,657 ± 0,029</b>	<b>5,364 ± 0,215</b>	<b>9,109 ± 0,231</b>
<b>5</b>	A	0,748 ± 0,121	4,997 ± 1,872	7,241 ± 3,512
	B	0,814 ± 0,051	5,108 ± 1,329	8,111 ± 3,352
	C	0,807 ± 0,067	5,221 ± 1,073	7,726 ± 3,109
	D	0,829 ± 0,074	5,549 ± 1,992	7,918 ± 3,249
	E	0,825 ± 0,069	5,289 ± 1,143	7,634 ± 2,671
	<b>Arit. pr.</b>	<b>0,805 ± 0,029</b>	<b>5,233 ± 0,187</b>	<b>7,726 ± 0,293</b>
<b>6</b>	A	0,869 ± 0,068	6,619 ± 1,328	9,842 ± 3,214
	B	0,910 ± 0,091	6,349 ± 1,421	10,549 ± 2,982
	C	0,882 ± 0,062	6,520 ± 1,172	12,004 ± 3,480
	D	0,851 ± 0,112	6,787 ± 1,672	14,661 ± 3,874
	E	0,893 ± 0,074	6,480 ± 1,330	13,545 ± 3,551
	<b>Arit. pr.</b>	<b>0,881 ± 0,020</b>	<b>6,551 ± 0,146</b>	<b>12,120 ± 1,798</b>

Drsnost povrchu - za sucha				
Materiál		Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rt [ $\mu\text{m}$ ]
7	A	0,841 $\pm$ 0,067	5,447 $\pm$ 1,107	7,187 $\pm$ 2,848
	B	0,879 $\pm$ 0,088	5,919 $\pm$ 1,329	8,241 $\pm$ 3,004
	C	0,851 $\pm$ 0,048	5,600 $\pm$ 0,974	7,938 $\pm$ 2,228
	D	0,833 $\pm$ 0,082	5,510 $\pm$ 0,825	8,124 $\pm$ 2,771
	E	0,849 $\pm$ 0,037	5,419 $\pm$ 0,983	8,204 $\pm$ 2,992
	Arit. pr.	0,851 $\pm$ 0,016	5,579 $\pm$ 0,181	7,939 $\pm$ 0,390
8	A	0,702 $\pm$ 0,124	4,889 $\pm$ 1,782	11,248 $\pm$ 4,881
	B	0,689 $\pm$ 0,072	5,394 $\pm$ 1,626	9,484 $\pm$ 5,101
	C	0,668 $\pm$ 0,080	5,133 $\pm$ 1,281	11,078 $\pm$ 5,343
	D	0,631 $\pm$ 0,109	4,927 $\pm$ 1,901	13,543 $\pm$ 5,841
	E	0,652 $\pm$ 0,064	5,284 $\pm$ 1,424	10,246 $\pm$ 4,108
	Arit. pr.	0,668 $\pm$ 0,025	5,125 $\pm$ 0,196	11,120 $\pm$ 1,366
9	A	0,594 $\pm$ 0,136	4,894 $\pm$ 1,440	9,152 $\pm$ 3,841
	B	0,541 $\pm$ 0,072	5,249 $\pm$ 1,572	9,542 $\pm$ 3,991
	C	0,550 $\pm$ 0,090	5,046 $\pm$ 1,144	9,395 $\pm$ 3,495
	D	0,532 $\pm$ 0,101	4,972 $\pm$ 1,324	9,500 $\pm$ 2,878
	E	0,538 $\pm$ 0,83	5,111 $\pm$ 1,229	9,362 $\pm$ 2,625
	Arit. pr.	0,551 $\pm$ 0,022	5,054 $\pm$ 0,121	9,390 $\pm$ 0,136
10	A	0,906 $\pm$ 0,249	6,541 $\pm$ 2,876	14,984 $\pm$ 5,214
	B	0,837 $\pm$ 0,125	6,908 $\pm$ 1,881	18,249 $\pm$ 4,127
	C	0,826 $\pm$ 0,211	6,961 $\pm$ 2,216	16,382 $\pm$ 7,744
	D	0,774 $\pm$ 0,232	7,248 $\pm$ 2,441	15,545 $\pm$ 4,441
	E	0,792 $\pm$ 0,172	7,059 $\pm$ 1,785	16,848 $\pm$ 5,102
	Arit. pr.	0,827 $\pm$ 0,046	6,943 $\pm$ 0,232	16,402 $\pm$ 1,127
11	A	0,811 $\pm$ 0,175	6,089 $\pm$ 1,502	10,714 $\pm$ 4,108
	B	0,742 $\pm$ 0,081	6,417 $\pm$ 1,752	12,248 $\pm$ 3,415
	C	0,769 $\pm$ 0,129	6,204 $\pm$ 1,341	11,805 $\pm$ 4,638
	D	0,755 $\pm$ 0,061	6,118 $\pm$ 1,102	13,144 $\pm$ 4,457
	E	0,772 $\pm$ 0,076	6,199 $\pm$ 0,874	11,219 $\pm$ 3,201
	Arit. pr.	0,770 $\pm$ 0,023	6,205 $\pm$ 0,115	11,826 $\pm$ 0,839
12	A	1,092 $\pm$ 0,132	9,628 $\pm$ 1,872	14,415 $\pm$ 5,578
	B	1,155 $\pm$ 0,148	9,713 $\pm$ 1,514	19,942 $\pm$ 4,107
	C	1,136 $\pm$ 0,167	9,852 $\pm$ 1,645	18,926 $\pm$ 5,317
	D	1,110 $\pm$ 0,102	10,241 $\pm$ 2,127	21,176 $\pm$ 5,025
	E	1,188 $\pm$ 0,094	9,814 $\pm$ 1,245	18,642 $\pm$ 3,874
	Arit. pr.	1,136 $\pm$ 0,034	9,850 $\pm$ 0,211	18,620 $\pm$ 2,283

**Drsnost povrchu při broušení s procesní kapalinou a úběru 1 mm**

<b>Drsnost povrchu - procesní kapalina</b>				
<b>Materiál</b>		<b>Ra [μm]</b>	<b>Rz [μm]</b>	<b>Rt [μm]</b>
<b>1</b>	A	0,498 ± 0,081	3,829 ± 0,923	7,234 ± 2,875
	B	0,508 ± 0,047	4,217 ± 1,142	6,978 ± 2,461
	C	0,512 ± 0,056	4,071 ± 0,769	6,833 ± 2,367
	D	0,539 ± 0,062	4,185 ± 1,293	6,424 ± 2,664
	E	0,501 ± 0,041	3,924 ± 0,836	6,724 ± 1,984
	<b>Arit. pr.</b>	<b>0,512 ± 0,015</b>	<b>4,034 ± 0,149</b>	<b>6,839 ± 0,269</b>
<b>2</b>	A	0,615 ± 0,112	5,547 ± 1,345	13,487 ± 3,772
	B	0,601 ± 0,099	5,289 ± 0,982	10,993 ± 3,514
	C	0,569 ± 0,092	5,339 ± 1,121	11,429 ± 3,228
	D	0,517 ± 0,124	5,417 ± 0,819	11,254 ± 2,878
	E	0,542 ± 0,075	5,327 ± 1,253	9,874 ± 4,101
	<b>Arit. pr.</b>	<b>0,569 ± 0,036</b>	<b>5,384 ± 0,092</b>	<b>11,407 ± 1,172</b>
<b>3</b>	A	0,471 ± 0,153	4,981 ± 1,424	11,024 ± 3,823
	B	0,522 ± 0,086	4,886 ± 0,892	10,248 ± 3,567
	C	0,514 ± 0,107	4,856 ± 1,201	9,224 ± 3,180
	D	0,555 ± 0,129	4,718 ± 1,316	9,017 ± 2,667
	E	0,502 ± 0,074	4,802 ± 0,714	8,247 ± 3,251
	<b>Arit. pr.</b>	<b>0,513 ± 0,027</b>	<b>4,849 ± 0,087</b>	<b>9,552 ± 0,974</b>
<b>4</b>	A	0,452 ± 0,064	4,627 ± 1,313	7,891 ± 2,992
	B	0,508 ± 0,081	4,689 ± 1,285	8,345 ± 1,871
	C	0,486 ± 0,036	4,872 ± 1,010	8,280 ± 2,545
	D	0,492 ± 0,043	5,134 ± 1,676	8,541 ± 2,222
	E	0,500 ± 0,055	4,974 ± 0,957	8,340 ± 1,981
	<b>Arit. pr.</b>	<b>0,488 ± 0,019</b>	<b>4,859 ± 0,185</b>	<b>8,279 ± 0,213</b>
<b>5</b>	A	0,612 ± 0,094	5,664 ± 1,111	13,472 ± 3,878
	B	0,588 ± 0,112	5,927 ± 0,825	10,269 ± 3,121
	C	0,633 ± 0,075	5,778 ± 0,973	11,250 ± 3,670
	D	0,690 ± 0,085	5,702 ± 1,321	10,829 ± 2,879
	E	0,652 ± 0,061	6,025 ± 1,238	10,543 ± 3,002
	<b>Arit. pr.</b>	<b>0,635 ± 0,035</b>	<b>5,819 ± 0,137</b>	<b>11,273 ± 1,147</b>
<b>6</b>	A	0,567 ± 0,141	4,127 ± 1,581	5,980 ± 2,874
	B	0,511 ± 0,138	4,019 ± 1,267	6,274 ± 3,549
	C	0,534 ± 0,157	3,922 ± 1,370	6,060 ± 3,388
	D	0,559 ± 0,168	3,617 ± 1,681	5,893 ± 2,714
	E	0,520 ± 0,114	3,898 ± 0,924	6,107 ± 2,555
	<b>Arit. pr.</b>	<b>0,538 ± 0,022</b>	<b>3,917 ± 0,170</b>	<b>6,063 ± 0,128</b>

Drsnost povrchu - procesní kapalina				
Materiál		Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rt [ $\mu\text{m}$ ]
7	A	$0,581 \pm 0,087$	$5,217 \pm 1,781$	$10,743 \pm 4,100$
	B	$0,608 \pm 0,072$	$5,559 \pm 1,029$	$8,691 \pm 3,854$
	C	$0,594 \pm 0,117$	$5,477 \pm 1,595$	$9,592 \pm 3,560$
	D	$0,621 \pm 0,135$	$5,609 \pm 1,323$	$9,214 \pm 2,962$
	E	$0,569 \pm 0,148$	$5,492 \pm 0,846$	$10,014 \pm 2,814$
	Arit. pr.	<b><math>0,595 \pm 0,019</math></b>	<b><math>5,471 \pm 0,135</math></b>	<b><math>9,651 \pm 0,699</math></b>
8	A	$0,618 \pm 0,084$	$5,429 \pm 1,410$	$9,809 \pm 2,772$
	B	$0,628 \pm 0,058$	$5,618 \pm 0,824$	$8,947 \pm 3,412$
	C	$0,632 \pm 0,144$	$5,642 \pm 1,247$	$9,855 \pm 3,018$
	D	$0,666 \pm 0,102$	$5,894 \pm 0,931$	$10,679 \pm 3,595$
	E	$0,607 \pm 0,129$	$5,642 \pm 0,714$	$10,101 \pm 3,108$
	Arit. pr.	<b><math>0,630 \pm 0,020</math></b>	<b><math>5,645 \pm 0,148</math></b>	<b><math>9,878 \pm 0,559</math></b>
9	A	$0,509 \pm 0,088$	$5,124 \pm 1,418$	$11,135 \pm 3,748$
	B	$0,524 \pm 0,069$	$5,647 \pm 1,780$	$8,589 \pm 2,865$
	C	$0,549 \pm 0,041$	$5,256 \pm 1,184$	$9,250 \pm 3,098$
	D	$0,585 \pm 0,105$	$5,024 \pm 1,263$	$8,886 \pm 2,414$
	E	$0,569 \pm 0,062$	$5,213 \pm 0,855$	$8,414 \pm 3,121$
	Arit. pr.	<b><math>0,547 \pm 0,028</math></b>	<b><math>5,253 \pm 0,213</math></b>	<b><math>9,255 \pm 0,982</math></b>
10	A	$0,810 \pm 0,183$	$7,178 \pm 2,001$	$14,248 \pm 3,951$
	B	$0,741 \pm 0,119$	$7,496 \pm 1,629$	$11,096 \pm 2,888$
	C	$0,752 \pm 0,177$	$7,385 \pm 1,732$	$13,010 \pm 3,604$
	D	$0,747 \pm 0,127$	$7,555 \pm 1,336$	$13,746 \pm 2,482$
	E	$0,732 \pm 0,152$	$7,321 \pm 1,113$	$12,911 \pm 2,114$
	Arit. pr.	<b><math>0,756 \pm 0,028</math></b>	<b><math>7,387 \pm 0,133</math></b>	<b><math>13,002 \pm 1,072</math></b>
11	A	$0,506 \pm 0,108$	$5,234 \pm 1,982$	$8,102 \pm 2,661$
	B	$0,511 \pm 0,116$	$4,894 \pm 1,451$	$7,744 \pm 3,102$
	C	$0,490 \pm 0,098$	$4,707 \pm 1,239$	$8,169 \pm 3,369$
	D	$0,462 \pm 0,138$	$4,264 \pm 1,825$	$9,089 \pm 2,981$
	E	$0,478 \pm 0,082$	$4,511 \pm 1,349$	$8,004 \pm 2,251$
	Arit. pr.	<b><math>0,489 \pm 0,018</math></b>	<b><math>4,722 \pm 0,331</math></b>	<b><math>8,222 \pm 0,457</math></b>
12	A	$0,733 \pm 0,064$	$5,123 \pm 1,192$	$7,102 \pm 1,109$
	B	$0,719 \pm 0,069$	$4,897 \pm 0,756$	$6,742 \pm 0,988$
	C	$0,725 \pm 0,080$	$4,814 \pm 0,427$	$6,339 \pm 0,893$
	D	$0,701 \pm 0,102$	$4,629 \pm 0,681$	$5,875 \pm 1,421$
	E	$0,741 \pm 0,093$	$4,709 \pm 0,533$	$6,069 \pm 1,005$
	Arit. pr.	<b><math>0,724 \pm 0,014</math></b>	<b><math>4,834 \pm 0,171</math></b>	<b><math>6,425 \pm 0,446</math></b>



## Příloha 2 - Rozměrová přesnost

Rozměrová přesnost při broušení za sucha a úběru 0,02 mm

Rozměrová přesnost - za sucha						
Materiál		Po broušení [mm]	24 hodin [mm]	168 hodin (týden) [mm]	672 hodin (4 týdny) [mm]	1008 hodin (6 týdnů) [mm]
1	A	20,000 ± 0,001	19,997 ± 0,001	19,998 ± 0,002	19,993 ± 0,001	19,995 ± 0,002
	B	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,997 ± 0,001	19,994 ± 0,001	19,996 ± 0,001
	C	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,997 ± 0,002	19,994 ± 0,001	19,996 ± 0,001
	D	20,000 ± 0,001	19,997 ± 0,002	19,998 ± 0,001	19,995 ± 0,002	19,997 ± 0,003
	E	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,994 ± 0,002	19,996 ± 0,001
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,998 ± 0,000</b>	<b>19,998 ± 0,000</b>	<b>19,994 ± 0,001</b>	<b>19,996 ± 0,001</b>
2	A	20,000 ± 0,001	20,000 ± 0,001	20,000 ± 0,001	19,997 ± 0,001	19,999 ± 0,001
	B	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,997 ± 0,001	19,998 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,996 ± 0,002	19,998 ± 0,001
	D	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,002	19,999 ± 0,002	19,997 ± 0,001	19,999 ± 0,001
	E	20,000 ± 0,001	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,002	19,998 ± 0,003	19,999 ± 0,002
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,999 ± 0,001</b>	<b>19,997 ± 0,001</b>	<b>19,999 ± 0,000</b>
3	A	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,998 ± 0,002	19,994 ± 0,001	19,996 ± 0,001
	B	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,000	20,001 ± 0,002	19,994 ± 0,001	19,995 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,002	19,999 ± 0,001	19,998 ± 0,003	19,993 ± 0,002	19,995 ± 0,001
	D	20,000 ± 0,002	19,999 ± 0,001	19,999 ± 0,002	19,995 ± 0,002	19,996 ± 0,001
	E	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,002	19,998 ± 0,002	19,994 ± 0,001	19,996 ± 0,002
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,999 ± 0,000</b>	<b>19,999 ± 0,001</b>	<b>19,994 ± 0,001</b>	<b>19,996 ± 0,000</b>
4	A	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,995 ± 0,001	19,997 ± 0,002
	B	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,001	19,999 ± 0,002	19,995 ± 0,000	19,998 ± 0,001
	C	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,002	19,998 ± 0,001	19,994 ± 0,001	19,997 ± 0,001
	D	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,002	19,999 ± 0,001	19,995 ± 0,002	19,998 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,002	19,999 ± 0,001	19,999 ± 0,002	19,995 ± 0,001	19,998 ± 0,001
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,999 ± 0,000</b>	<b>19,999 ± 0,000</b>	<b>19,995 ± 0,000</b>	<b>19,998 ± 0,000</b>
5	A	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001	19,994 ± 0,000	20,000 ± 0,001
	B	20,000 ± 0,002	19,999 ± 0,002	19,997 ± 0,003	19,995 ± 0,003	20,000 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,001	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,994 ± 0,001	19,998 ± 0,003
	D	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,002	19,997 ± 0,003	19,995 ± 0,002	20,000 ± 0,001
	E	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,002	19,995 ± 0,003	20,000 ± 0,002
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,998 ± 0,000</b>	<b>19,995 ± 0,000</b>	<b>20,000 ± 0,001</b>
6	A	20,000 ± 0,003	19,999 ± 0,003	19,998 ± 0,003	19,997 ± 0,004	19,997 ± 0,002
	B	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,996 ± 0,001	19,996 ± 0,000	19,998 ± 0,001
	C	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,002	19,997 ± 0,002	19,997 ± 0,002	19,998 ± 0,001
	D	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,002	19,998 ± 0,002	19,997 ± 0,003	19,999 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,002	19,999 ± 0,002	19,997 ± 0,001	19,996 ± 0,001	19,998 ± 0,002
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,999 ± 0,000</b>	<b>19,997 ± 0,001</b>	<b>19,997 ± 0,001</b>	<b>19,998 ± 0,000</b>

Rozměrová přesnost - za sucha						
Materiál		Po broušení [mm]	24 hodin [mm]	168 hodin (týden) [mm]	672 hodin (4 týdny) [mm]	1008 hodin (6 týdnů) [mm]
7	A	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,999 ± 0,001	19,997 ± 0,001	19,999 ± 0,001
	B	20,000 ± 0,000	19,997 ± 0,001	19,998 ± 0,000	19,996 ± 0,001	19,998 ± 0,000
	C	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,999 ± 0,001	19,997 ± 0,001	19,998 ± 0,001
	D	20,000 ± 0,001	19,997 ± 0,002	19,998 ± 0,001	19,996 ± 0,002	19,998 ± 0,001
	E	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001	19,999 ± 0,002	19,997 ± 0,001	19,999 ± 0,002
	Arit. pr.	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,997 ± 0,000	19,998 ± 0,000
8	A	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,995 ± 0,001	19,995 ± 0,000	19,996 ± 0,000
	B	20,000 ± 0,002	19,997 ± 0,001	19,993 ± 0,001	19,993 ± 0,001	19,995 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,001	19,997 ± 0,002	19,994 ± 0,001	19,994 ± 0,002	19,995 ± 0,001
	D	20,000 ± 0,002	19,998 ± 0,001	19,995 ± 0,002	19,995 ± 0,001	19,996 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001	19,995 ± 0,002	19,995 ± 0,001	19,996 ± 0,000
	Arit. pr.	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,994 ± 0,001	19,994 ± 0,001	19,996 ± 0,000
9	A	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,999 ± 0,001
	B	20,000 ± 0,001	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,002	19,997 ± 0,001	19,999 ± 0,000
	C	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,997 ± 0,002	19,998 ± 0,002
	D	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,002	19,999 ± 0,002	19,998 ± 0,001	19,999 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,002	19,998 ± 0,000	19,999 ± 0,001
	Arit. pr.	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,999 ± 0,000
10	A	20,000 ± 0,001	20,001 ± 0,001	19,999 ± 0,001	19,997 ± 0,001	20,000 ± 0,001
	B	20,000 ± 0,001	20,002 ± 0,001	19,999 ± 0,000	19,998 ± 0,001	20,000 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,001	20,001 ± 0,002	20,000 ± 0,002	19,998 ± 0,001	20,000 ± 0,001
	D	20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,001	19,999 ± 0,001	19,997 ± 0,002	19,999 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,002	19,999 ± 0,001	19,998 ± 0,001	20,000 ± 0,001
	Arit. pr.	20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,001	19,999 ± 0,000	19,998 ± 0,000	20,000 ± 0,000
11	A	20,000 ± 0,001	20,000 ± 0,001	19,997 ± 0,001	19,996 ± 0,001	19,998 ± 0,002
	B	20,000 ± 0,001	20,001 ± 0,001	19,997 ± 0,001	19,997 ± 0,001	19,999 ± 0,001
	C	20,000 ± 0,002	20,001 ± 0,001	19,998 ± 0,002	19,998 ± 0,002	19,999 ± 0,001
	D	20,000 ± 0,001	20,001 ± 0,002	19,998 ± 0,001	19,997 ± 0,002	19,999 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,002	20,000 ± 0,001	19,997 ± 0,001	19,996 ± 0,002	19,998 ± 0,003
	Arit. pr.	20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,000	19,997 ± 0,000	19,997 ± 0,001	19,999 ± 0,000
12	A	20,000 ± 0,002	20,000 ± 0,002	19,998 ± 0,002	19,996 ± 0,002	19,998 ± 0,002
	B	20,000 ± 0,001	20,000 ± 0,001	19,997 ± 0,001	19,997 ± 0,000	20,000 ± 0,000
	C	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,001	19,997 ± 0,002	19,996 ± 0,002	19,999 ± 0,001
	D	20,000 ± 0,002	20,000 ± 0,002	19,998 ± 0,001	19,997 ± 0,001	20,001 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,001	19,998 ± 0,002	19,997 ± 0,001	20,000 ± 0,001
	Arit. pr.	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,000	19,997 ± 0,000	20,000 ± 0,001

# Rozměrová přesnost při broušení s procesní kapalinou a úběru 0,02 mm

Rozměrová přesnost - procesní kapalina						
Materiál		Po broušení [mm]	24 hodin [mm]	168 hodin (týden) [mm]	672 hodin (4 týdny) [mm]	1008 hodin (6 týdnů) [mm]
1	A	20,000 ± 0,001	19,997 ± 0,001	19,999 ± 0,001	20,000 ± 0,001	20,000 ± 0,001
	B	20,000 ± 0,001	19,997 ± 0,001	19,998 ± 0,002	19,998 ± 0,002	19,999 ± 0,001
	C	20,000 ± 0,002	19,996 ± 0,002	19,998 ± 0,001	19,999 ± 0,001	20,000 ± 0,002
	D	20,000 ± 0,001	19,997 ± 0,002	19,999 ± 0,002	20,000 ± 0,002	20,001 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,002	19,999 ± 0,002	20,000 ± 0,002	20,000 ± 0,001
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,997 ± 0,001</b>	<b>19,999 ± 0,000</b>	<b>19,999 ± 0,001</b>	<b>20,000 ± 0,001</b>
2	A	20,000 ± 0,002	19,997 ± 0,001	19,996 ± 0,002	19,993 ± 0,002	19,997 ± 0,002
	B	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,995 ± 0,001	19,998 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,996 ± 0,003	19,994 ± 0,001	19,997 ± 0,001
	D	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,002	19,997 ± 0,002	19,994 ± 0,001	19,997 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,002	19,998 ± 0,001	19,997 ± 0,002	19,993 ± 0,002	19,996 ± 0,002
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,998 ± 0,001</b>	<b>19,997 ± 0,001</b>	<b>19,994 ± 0,001</b>	<b>19,997 ± 0,001</b>
3	A	20,000 ± 0,001	19,996 ± 0,002	20,000 ± 0,002	19,996 ± 0,001	20,001 ± 0,002
	B	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,000	19,999 ± 0,001	19,995 ± 0,001	20,000 ± 0,001
	C	20,000 ± 0,000	19,996 ± 0,003	19,998 ± 0,002	19,996 ± 0,001	20,000 ± 0,002
	D	20,000 ± 0,001	19,997 ± 0,001	19,999 ± 0,001	19,997 ± 0,002	20,001 ± 0,001
	E	20,000 ± 0,002	19,998 ± 0,002	19,999 ± 0,002	19,996 ± 0,002	20,000 ± 0,002
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,997 ± 0,001</b>	<b>19,999 ± 0,001</b>	<b>19,996 ± 0,001</b>	<b>20,000 ± 0,000</b>
4	A	20,000 ± 0,001	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,000	20,000 ± 0,001	20,001 ± 0,001
	B	20,000 ± 0,002	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,001	20,001 ± 0,001	20,001 ± 0,001
	C	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,002	19,997 ± 0,001	19,997 ± 0,003	20,000 ± 0,002
	D	20,000 ± 0,002	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,002	19,998 ± 0,002	20,001 ± 0,001
	E	20,000 ± 0,002	19,999 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,998 ± 0,002	20,000 ± 0,002
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>20,000 ± 0,001</b>	<b>19,998 ± 0,000</b>	<b>20,001 ± 0,000</b>
5	A	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,000	19,995 ± 0,000	19,997 ± 0,001
	B	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,001	19,998 ± 0,000	19,993 ± 0,000	19,996 ± 0,001
	C	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,994 ± 0,001	19,997 ± 0,002
	D	20,000 ± 0,001	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,994 ± 0,001	19,996 ± 0,001
	E	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,002	19,997 ± 0,002	19,995 ± 0,002	19,996 ± 0,001
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,999 ± 0,000</b>	<b>19,998 ± 0,001</b>	<b>19,994 ± 0,001</b>	<b>19,996 ± 0,000</b>
6	A	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,001	19,999 ± 0,001	19,996 ± 0,001	19,998 ± 0,001
	B	20,000 ± 0,001	19,996 ± 0,002	19,998 ± 0,001	19,994 ± 0,001	19,997 ± 0,001
	C	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,994 ± 0,001	19,997 ± 0,002
	D	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,002	19,998 ± 0,002	19,995 ± 0,002	19,998 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,001	19,997 ± 0,002	19,997 ± 0,002	19,994 ± 0,001	19,997 ± 0,001
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,998 ± 0,001</b>	<b>19,998 ± 0,001</b>	<b>19,995 ± 0,001</b>	<b>19,997 ± 0,000</b>

Rozměrová přesnost - procesní kapalina						
Materiál		Po broušení [mm]	24 hodin [mm]	168 hodin (týden) [mm]	672 hodin (4 týdny) [mm]	1008 hodin (6 týdnů) [mm]
7	A	20,000 ± 0,004	19,999 ± 0,003	19,999 ± 0,004	19,998 ± 0,003	20,001 ± 0,004
	B	20,000 ± 0,002	20,001 ± 0,002	19,999 ± 0,001	19,998 ± 0,002	20,000 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,002	20,000 ± 0,002	19,999 ± 0,002	19,999 ± 0,003	20,001 ± 0,001
	D	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,002	19,998 ± 0,002	19,998 ± 0,001	20,000 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,002	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,997 ± 0,002	20,000 ± 0,002
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,999 ± 0,000</b>	<b>19,998 ± 0,001</b>	<b>20,000 ± 0,000</b>
8	A	20,000 ± 0,002	20,000 ± 0,001	20,001 ± 0,001	19,999 ± 0,001	20,001 ± 0,002
	B	20,000 ± 0,001	20,000 ± 0,001	20,002 ± 0,001	20,000 ± 0,002	20,003 ± 0,001
	C	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,001	20,000 ± 0,002	19,999 ± 0,001	20,001 ± 0,002
	D	20,000 ± 0,002	19,999 ± 0,002	20,001 ± 0,001	20,000 ± 0,001	20,003 ± 0,001
	E	20,000 ± 0,001	20,000 ± 0,001	20,001 ± 0,002	20,000 ± 0,002	20,003 ± 0,001
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>20,001 ± 0,001</b>	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>20,002 ± 0,001</b>
9	A	20,000 ± 0,002	19,998 ± 0,000	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,999 ± 0,001
	B	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001	20,002 ± 0,000	19,998 ± 0,001	20,000 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,001	20,001 ± 0,001	19,997 ± 0,002	19,999 ± 0,001
	D	20,000 ± 0,001	19,997 ± 0,002	20,000 ± 0,002	19,998 ± 0,001	19,999 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,002	19,999 ± 0,001	20,001 ± 0,001	19,999 ± 0,002	20,000 ± 0,002
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,998 ± 0,001</b>	<b>20,001 ± 0,001</b>	<b>19,998 ± 0,001</b>	<b>19,999 ± 0,000</b>
10	A	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001	19,999 ± 0,001	19,996 ± 0,001	19,999 ± 0,001
	B	20,000 ± 0,001	19,997 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,996 ± 0,001	19,998 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,999 ± 0,001	19,996 ± 0,001	19,997 ± 0,002
	D	20,000 ± 0,000	19,997 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,995 ± 0,002	19,999 ± 0,001
	E	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,999 ± 0,002	19,997 ± 0,002	20,000 ± 0,002
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,998 ± 0,000</b>	<b>19,999 ± 0,000</b>	<b>19,996 ± 0,001</b>	<b>19,999 ± 0,001</b>
11	A	20,000 ± 0,002	19,999 ± 0,002	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,002	19,998 ± 0,002
	B	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,001	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,997 ± 0,001
	C	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,002	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,001	19,997 ± 0,001
	D	20,000 ± 0,002	19,999 ± 0,001	19,999 ± 0,001	19,998 ± 0,002	19,997 ± 0,001
	E	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,002	19,999 ± 0,002	19,999 ± 0,002	19,998 ± 0,002
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,999 ± 0,000</b>	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,999 ± 0,000</b>	<b>19,997 ± 0,000</b>
12	A	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,002	19,998 ± 0,001	19,996 ± 0,002	19,996 ± 0,001
	B	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,995 ± 0,001	19,995 ± 0,000
	C	20,000 ± 0,001	20,000 ± 0,002	19,999 ± 0,002	19,996 ± 0,001	19,995 ± 0,001
	D	20,000 ± 0,000	19,999 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,996 ± 0,002	19,996 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,002	19,998 ± 0,002	19,995 ± 0,002	19,995 ± 0,002
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,999 ± 0,001</b>	<b>19,998 ± 0,000</b>	<b>19,996 ± 0,000</b>	<b>19,995 ± 0,000</b>

# Rozměrová přesnost při broušení za sucha a úběru 1 mm

Rozměrová přesnost - za sucha				
Materiál		Po broušení [mm]	24 hodin [mm]	168 hodin (týden) [mm]
1	A	20,000 ± 0,002	19,993 ± 0,002	19,997 ± 0,001
	B	20,000 ± 0,001	19,994 ± 0,001	19,997 ± 0,001
	C	20,000 ± 0,001	19,993 ± 0,001	19,996 ± 0,002
	D	20,000 ± 0,001	19,994 ± 0,002	19,997 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,002	19,993 ± 0,002	19,997 ± 0,001
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,993 ± 0,000</b>	<b>19,997 ± 0,000</b>
2	A	20,000 ± 0,002	19,998 ± 0,002	19,996 ± 0,003
	B	20,000 ± 0,002	19,997 ± 0,001	19,995 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,001	19,997 ± 0,001	19,996 ± 0,002
	D	20,000 ± 0,002	19,999 ± 0,003	19,997 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,002	19,996 ± 0,002
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,998 ± 0,001</b>	<b>19,996 ± 0,001</b>
3	A	20,000 ± 0,001	19,994 ± 0,002	19,994 ± 0,002
	B	20,000 ± 0,001	19,995 ± 0,002	19,994 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,001	19,993 ± 0,002	19,993 ± 0,002
	D	20,000 ± 0,002	19,994 ± 0,001	19,995 ± 0,001
	E	20,000 ± 0,001	19,995 ± 0,002	19,995 ± 0,002
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,994 ± 0,001</b>	<b>19,994 ± 0,001</b>
4	A	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,001	20,002 ± 0,001
	B	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001	20,001 ± 0,001
	C	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,002	20,002 ± 0,001
	D	20,000 ± 0,001	19,997 ± 0,002	20,001 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,002	19,998 ± 0,001	20,002 ± 0,001
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,998 ± 0,000</b>	<b>20,002 ± 0,000</b>
5	A	20,000 ± 0,002	20,000 ± 0,002	19,998 ± 0,002
	B	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,001	19,997 ± 0,001
	C	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,002	19,998 ± 0,001
	D	20,000 ± 0,002	20,000 ± 0,002	19,998 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,001	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,002
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,998 ± 0,001</b>
6	A	20,000 ± 0,003	19,997 ± 0,003	20,001 ± 0,004
	B	20,000 ± 0,001	19,997 ± 0,002	20,002 ± 0,003
	C	20,000 ± 0,002	19,996 ± 0,002	20,000 ± 0,002
	D	20,000 ± 0,001	19,997 ± 0,001	20,001 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,002	20,002 ± 0,001
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,997 ± 0,001</b>	<b>20,001 ± 0,001</b>

Rozměrová přesnost - za sucha				
Materiál		Po broušení [mm]	24 hodin [mm]	168 hodin (týden) [mm]
7	A	20,000 ± 0,002	19,997 ± 0,002	19,999 ± 0,001
	B	20,000 ± 0,001	19,996 ± 0,001	19,999 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,001	19,996 ± 0,001	19,998 ± 0,002
	D	20,000 ± 0,002	19,997 ± 0,002	19,999 ± 0,001
	E	20,000 ± 0,001	19,997 ± 0,002	19,999 ± 0,002
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,997 ± 0,000</b>	<b>19,999 ± 0,000</b>
8	A	20,000 ± 0,002	19,998 ± 0,003	20,002 ± 0,002
	B	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,002	20,002 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,002	19,998 ± 0,002	20,001 ± 0,002
	D	20,000 ± 0,002	19,997 ± 0,002	20,001 ± 0,001
	E	20,000 ± 0,002	19,997 ± 0,002	20,002 ± 0,001
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,998 ± 0,001</b>	<b>20,002 ± 0,000</b>
9	A	20,000 ± 0,002	19,998 ± 0,002	20,000 ± 0,002
	B	20,000 ± 0,001	19,997 ± 0,001	19,999 ± 0,001
	C	20,000 ± 0,001	19,997 ± 0,002	20,000 ± 0,001
	D	20,000 ± 0,002	19,998 ± 0,002	20,000 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,001	20,000 ± 0,001
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,998 ± 0,000</b>	<b>20,000 ± 0,000</b>
10	A	20,000 ± 0,003	19,999 ± 0,002	19,999 ± 0,002
	B	20,000 ± 0,002	19,998 ± 0,002	19,998 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,002	19,999 ± 0,001	19,999 ± 0,001
	D	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,001	19,999 ± 0,001
	E	20,000 ± 0,002	19,999 ± 0,002	19,998 ± 0,002
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,999 ± 0,000</b>	<b>19,999 ± 0,000</b>
11	A	20,000 ± 0,002	19,997 ± 0,002	19,999 ± 0,002
	B	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,001	20,000 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,002	19,997 ± 0,001	20,000 ± 0,001
	D	20,000 ± 0,002	19,997 ± 0,002	19,999 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,001	19,996 ± 0,002	19,998 ± 0,002
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,997 ± 0,001</b>	<b>19,999 ± 0,001</b>
12	A	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,002	19,998 ± 0,002
	B	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,001	19,998 ± 0,001
	C	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,002	19,998 ± 0,002
	D	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,001	19,998 ± 0,001
	E	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001	19,997 ± 0,001
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,999 ± 0,000</b>	<b>19,998 ± 0,000</b>

# Rozměrová přesnost při broušení s procesní kapalinou a úběru 1 mm

Rozměrová přesnost - procesní kapalina				
Materiál		Po broušení [mm]	24 hodin [mm]	168 hodin (týden) [mm]
1	A	20,000 ± 0,001	20,001 ± 0,002	20,000 ± 0,002
	B	20,000 ± 0,001	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,001
	C	20,000 ± 0,002	20,001 ± 0,002	20,000 ± 0,002
	D	20,000 ± 0,001	20,001 ± 0,001	20,000 ± 0,001
	E	20,000 ± 0,002	20,001 ± 0,001	20,001 ± 0,001
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>20,001 ± 0,000</b>	<b>20,000 ± 0,001</b>
2	A	20,000 ± 0,002	20,001 ± 0,002	19,999 ± 0,002
	B	20,000 ± 0,001	20,001 ± 0,001	20,000 ± 0,001
	C	20,000 ± 0,002	20,000 ± 0,002	19,999 ± 0,002
	D	20,000 ± 0,002	20,000 ± 0,002	19,999 ± 0,001
	E	20,000 ± 0,002	20,001 ± 0,001	20,000 ± 0,001
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>20,001 ± 0,000</b>	<b>19,999 ± 0,000</b>
3	A	20,000 ± 0,003	20,001 ± 0,003	19,998 ± 0,004
	B	20,000 ± 0,002	20,002 ± 0,002	20,000 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,002	20,001 ± 0,002	19,998 ± 0,002
	D	20,000 ± 0,003	20,001 ± 0,002	19,998 ± 0,003
	E	20,000 ± 0,002	20,002 ± 0,001	19,998 ± 0,002
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>20,001 ± 0,000</b>	<b>19,998 ± 0,001</b>
4	A	20,000 ± 0,002	20,004 ± 0,001	20,002 ± 0,001
	B	20,000 ± 0,001	20,002 ± 0,002	20,001 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,001	20,003 ± 0,001	20,001 ± 0,001
	D	20,000 ± 0,002	20,004 ± 0,002	20,002 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,002	20,005 ± 0,003	20,002 ± 0,003
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>20,004 ± 0,001</b>	<b>20,002 ± 0,000</b>
5	A	20,000 ± 0,002	19,998 ± 0,005	20,000 ± 0,004
	B	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,002	20,000 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,001	19,999 ± 0,002	20,000 ± 0,003
	D	20,000 ± 0,001	19,998 ± 0,003	19,999 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,002	19,998 ± 0,003	19,999 ± 0,003
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>19,998 ± 0,000</b>	<b>20,000 ± 0,000</b>
6	A	20,000 ± 0,002	20,001 ± 0,002	19,998 ± 0,003
	B	20,000 ± 0,002	20,002 ± 0,002	19,999 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,002	20,001 ± 0,001	19,999 ± 0,002
	D	20,000 ± 0,001	20,001 ± 0,001	19,998 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,002	20,000 ± 0,002	19,998 ± 0,002
	Arit. pr.	<b>20,000 ± 0,000</b>	<b>20,001 ± 0,001</b>	<b>19,998 ± 0,000</b>

Rozměrová přesnost - procesní kapalina				
Materiál		Po broušení [mm]	24 hodin [mm]	168 hodin (týden) [mm]
7	A	20,000 ± 0,003	20,002 ± 0,004	19,999 ± 0,004
	B	20,000 ± 0,002	20,002 ± 0,003	19,999 ± 0,003
	C	20,000 ± 0,002	20,003 ± 0,002	20,000 ± 0,002
	D	20,000 ± 0,001	20,001 ± 0,001	19,998 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,003	20,002 ± 0,002	19,999 ± 0,002
	Arit. pr.	20,000 ± 0,000	20,002 ± 0,001	19,999 ± 0,001
8	A	20,000 ± 0,004	20,002 ± 0,005	19,999 ± 0,003
	B	20,000 ± 0,002	20,002 ± 0,002	20,000 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,002	20,002 ± 0,003	19,999 ± 0,002
	D	20,000 ± 0,003	20,001 ± 0,003	19,998 ± 0,003
	E	20,000 ± 0,002	20,002 ± 0,003	19,999 ± 0,002
	Arit. pr.	20,000 ± 0,000	20,002 ± 0,000	19,999 ± 0,001
9	A	20,000 ± 0,004	20,000 ± 0,004	19,998 ± 0,004
	B	20,000 ± 0,002	20,001 ± 0,002	19,999 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,002	20,000 ± 0,003	19,998 ± 0,003
	D	20,000 ± 0,003	20,000 ± 0,002	19,997 ± 0,003
	E	20,000 ± 0,002	20,001 ± 0,002	19,999 ± 0,002
	Arit. pr.	20,000 ± 0,000	20,000 ± 0,000	19,998 ± 0,001
10	A	20,000 ± 0,003	20,001 ± 0,003	19,999 ± 0,003
	B	20,000 ± 0,002	20,002 ± 0,002	20,000 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,002	20,001 ± 0,002	19,999 ± 0,001
	D	20,000 ± 0,001	20,001 ± 0,002	19,998 ± 0,003
	E	20,000 ± 0,003	20,002 ± 0,003	20,000 ± 0,002
	Arit. pr.	20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,000	19,999 ± 0,001
11	A	20,000 ± 0,004	20,001 ± 0,004	19,998 ± 0,004
	B	20,000 ± 0,003	20,002 ± 0,002	19,999 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,002	20,000 ± 0,003	19,999 ± 0,003
	D	20,000 ± 0,002	20,000 ± 0,002	19,998 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,003	20,001 ± 0,002	19,998 ± 0,002
	Arit. pr.	20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,001	19,998 ± 0,000
12	A	20,000 ± 0,003	20,001 ± 0,004	19,998 ± 0,003
	B	20,000 ± 0,002	20,003 ± 0,003	20,000 ± 0,002
	C	20,000 ± 0,003	20,001 ± 0,003	19,998 ± 0,003
	D	20,000 ± 0,002	20,001 ± 0,002	19,998 ± 0,002
	E	20,000 ± 0,001	20,001 ± 0,002	19,998 ± 0,002
	Arit. pr.	20,000 ± 0,000	20,001 ± 0,001	19,998 ± 0,001



## Příloha 3 - Řezné síly

### Smluvní řezná síla

Smluvní řezná síla			
Materiál		Za sucha [N]	Procesní kapalina [N]
1	A	19,350 ± 1,090	24,950 ± 1,590
	B	19,020 ± 0,880	25,540 ± 1,420
	C	19,770 ± 1,340	25,130 ± 1,740
	D	19,310 ± 1,220	24,740 ± 1,520
	E	19,220 ± 0,970	24,630 ± 1,690
	Arit. pr.	<b>19,330 ± 0,250</b>	<b>25,000 ± 0,320</b>
2	A	15,560 ± 0,970	22,190 ± 0,990
	B	14,880 ± 1,210	22,870 ± 1,310
	C	15,970 ± 1,020	22,540 ± 0,870
	D	15,640 ± 0,820	21,870 ± 1,150
	E	15,710 ± 0,950	21,950 ± 1,290
	Arit. pr.	<b>15,550 ± 0,360</b>	<b>22,280 ± 0,370</b>
3	A	40,220 ± 2,160	32,140 ± 0,950
	B	41,780 ± 2,330	31,810 ± 1,110
	C	39,140 ± 1,880	31,950 ± 0,910
	D	39,880 ± 1,740	32,280 ± 1,480
	E	40,100 ± 2,290	32,730 ± 1,360
	Arit. pr.	<b>40,220 ± 0,860</b>	<b>32,180 ± 0,320</b>
4	A	21,470 ± 1,440	23,120 ± 1,740
	B	20,050 ± 2,230	23,550 ± 1,620
	C	21,220 ± 1,740	23,820 ± 1,930
	D	22,130 ± 1,520	22,870 ± 1,640
	E	22,690 ± 2,050	22,710 ± 2,080
	Arit. pr.	<b>21,510 ± 0,890</b>	<b>23,210 ± 0,420</b>
5	A	19,040 ± 0,770	22,600 ± 1,240
	B	19,680 ± 0,890	22,340 ± 1,550
	C	19,220 ± 1,140	21,740 ± 1,900
	D	18,550 ± 1,330	22,960 ± 1,100
	E	18,700 ± 0,910	23,080 ± 1,820
	Arit. pr.	<b>19,040 ± 0,400</b>	<b>22,540 ± 0,480</b>
6	A	21,980 ± 1,010	23,640 ± 1,560
	B	23,000 ± 2,140	22,920 ± 1,740
	C	22,420 ± 1,460	23,150 ± 1,320
	D	21,340 ± 1,280	24,020 ± 1,880
	E	21,120 ± 1,510	23,890 ± 1,490
	Arit. pr.	<b>21,970 ± 0,690</b>	<b>23,520 ± 0,420</b>

Smluvní řezná síla			
Materiál		Za sucha [N]	Procesní kapalina [N]
7	A	18,690 ± 0,840	23,080 ± 1,140
	B	18,130 ± 1,110	23,540 ± 1,360
	C	18,890 ± 0,720	22,870 ± 0,990
	D	19,220 ± 1,320	22,590 ± 1,480
	E	18,540 ± 0,960	23,420 ± 1,270
	Arit. pr.	<b>18,690 ± 0,360</b>	<b>23,100 ± 0,350</b>
8	A	21,120 ± 1,040	26,060 ± 1,070
	B	20,590 ± 1,320	26,690 ± 1,430
	C	21,430 ± 0,870	26,140 ± 1,120
	D	21,080 ± 1,120	25,880 ± 1,570
	E	21,640 ± 0,920	25,740 ± 1,520
	Arit. pr.	<b>21,170 ± 0,360</b>	<b>26,100 ± 0,330</b>
9	A	21,500 ± 1,170	24,860 ± 1,160
	B	21,290 ± 1,010	23,720 ± 1,400
	C	20,640 ± 1,440	24,550 ± 1,020
	D	22,130 ± 1,560	25,190 ± 1,570
	E	21,880 ± 1,120	25,310 ± 1,690
	Arit. pr.	<b>21,490 ± 0,510</b>	<b>24,730 ± 0,570</b>
10	A	23,100 ± 1,880	23,630 ± 1,110
	B	22,740 ± 1,740	23,940 ± 1,300
	C	23,490 ± 2,020	23,290 ± 0,870
	D	23,020 ± 1,620	22,840 ± 1,290
	E	23,350 ± 1,550	24,050 ± 1,570
	Arit. pr.	<b>23,140 ± 0,260</b>	<b>23,550 ± 0,440</b>
11	A	21,170 ± 1,270	23,870 ± 0,910
	B	20,690 ± 0,880	23,190 ± 1,120
	C	20,870 ± 1,090	24,250 ± 0,820
	D	21,490 ± 1,170	23,970 ± 0,950
	E	21,370 ± 1,530	24,130 ± 1,290
	Arit. pr.	<b>21,120 ± 0,300</b>	<b>23,880 ± 0,370</b>
12	A	22,740 ± 1,310	28,670 ± 1,420
	B	21,650 ± 1,880	27,520 ± 2,250
	C	22,580 ± 1,220	28,140 ± 1,650
	D	23,050 ± 2,010	29,610 ± 1,920
	E	23,260 ± 1,720	29,010 ± 1,740
	Arit. pr.	<b>22,660 ± 0,560</b>	<b>28,590 ± 0,720</b>

## Maximální řezná síla

Maximální řezná síla			
Materiál		Za sucha [N]	Procesní kapalina [N]
1	A	81,680 ± 5,600	96,690 ± 6,170
	B	78,340 ± 4,270	100,070 ± 7,130
	C	79,290 ± 5,920	97,520 ± 4,220
	D	84,040 ± 6,220	92,880 ± 5,280
	E	82,990 ± 5,210	95,880 ± 6,410
	<b>Arit. pr.</b>	<b>81,270 ± 2,160</b>	<b>96,610 ± 2,330</b>
2	A	66,200 ± 4,330	86,070 ± 2,720
	B	64,330 ± 3,980	85,940 ± 3,130
	C	64,790 ± 5,210	88,640 ± 3,450
	D	66,880 ± 4,700	87,190 ± 2,620
	E	67,840 ± 5,530	84,130 ± 2,980
	<b>Arit. pr.</b>	<b>66,010 ± 1,300</b>	<b>86,390 ± 1,490</b>
3	A	155,180 ± 8,560	126,340 ± 2,970
	B	151,890 ± 9,210	124,220 ± 3,170
	C	155,780 ± 8,200	125,690 ± 2,140
	D	158,640 ± 7,260	128,960 ± 3,810
	E	155,020 ± 8,010	126,880 ± 2,700
	<b>Arit. pr.</b>	<b>155,300 ± 2,150</b>	<b>126,420 ± 1,550</b>
4	A	93,870 ± 6,350	91,170 ± 6,620
	B	89,540 ± 5,010	95,220 ± 8,200
	C	91,780 ± 6,150	94,650 ± 5,640
	D	95,290 ± 7,130	89,120 ± 5,880
	E	97,540 ± 7,420	87,530 ± 6,800
	<b>Arit. pr.</b>	<b>93,600 ± 2,770</b>	<b>91,540 ± 3,010</b>
5	A	82,610 ± 2,300	88,310 ± 5,630
	B	81,490 ± 3,020	92,140 ± 6,180
	C	81,990 ± 2,880	85,990 ± 6,600
	D	83,460 ± 2,460	87,140 ± 5,020
	E	82,910 ± 2,070	88,100 ± 4,610
	<b>Arit. pr.</b>	<b>82,490 ± 0,690</b>	<b>88,340 ± 2,070</b>
6	A	94,400 ± 4,640	91,080 ± 6,580
	B	97,250 ± 6,110	93,460 ± 6,160
	C	96,470 ± 5,320	92,590 ± 4,240
	D	92,230 ± 6,400	90,170 ± 5,640
	E	93,130 ± 4,250	88,450 ± 6,800
	<b>Arit. pr.</b>	<b>94,700 ± 1,910</b>	<b>91,150 ± 1,770</b>

Maximální řezná síla			
Materiál		Za sucha [N]	Procesní kapalina [N]
7	A	83,360 ± 4,260	90,460 ± 3,030
	B	83,960 ± 4,580	92,170 ± 4,400
	C	82,100 ± 5,190	88,540 ± 3,230
	D	80,740 ± 6,280	91,740 ± 4,080
	E	85,540 ± 4,130	90,050 ± 2,880
	Arit. pr.	<b>83,140 ± 1,630</b>	<b>90,590 ± 1,290</b>
8	A	88,140 ± 2,650	105,620 ± 4,000
	B	90,150 ± 3,340	102,340 ± 4,760
	C	88,740 ± 2,140	104,880 ± 3,270
	D	86,410 ± 3,810	108,970 ± 5,340
	E	87,190 ± 2,830	106,740 ± 3,580
	Arit. pr.	<b>88,130 ± 1,290</b>	<b>105,710 ± 2,180</b>
9	A	88,640 ± 3,910	93,060 ± 3,860
	B	87,250 ± 3,050	92,880 ± 3,250
	C	88,340 ± 4,150	95,240 ± 4,380
	D	90,430 ± 4,480	91,550 ± 4,120
	E	88,190 ± 3,670	92,740 ± 3,590
	Arit. pr.	<b>88,570 ± 1,040</b>	<b>93,090 ± 1,200</b>
10	A	92,850 ± 7,190	90,740 ± 3,510
	B	97,290 ± 8,640	92,660 ± 4,110
	C	94,330 ± 5,230	88,840 ± 3,980
	D	88,490 ± 8,210	91,230 ± 3,820
	E	90,190 ± 4,780	90,550 ± 3,470
	Arit. pr.	<b>92,630 ± 3,090</b>	<b>90,800 ± 1,230</b>
11	A	90,150 ± 5,070	91,640 ± 5,290
	B	87,640 ± 7,130	87,440 ± 6,410
	C	91,160 ± 6,360	89,290 ± 4,740
	D	93,140 ± 7,400	93,150 ± 5,130
	E	89,640 ± 5,250	95,410 ± 6,010
	Arit. pr.	<b>90,350 ± 1,810</b>	<b>91,390 ± 2,800</b>
12	A	92,070 ± 3,550	112,000 ± 4,620
	B	89,940 ± 4,170	110,460 ± 3,750
	C	93,160 ± 3,080	111,190 ± 3,270
	D	95,030 ± 4,830	115,490 ± 4,790
	E	90,850 ± 3,870	110,880 ± 3,920
	Arit. pr.	<b>92,210 ± 1,780</b>	<b>112,000 ± 1,710</b>

## Příloha 4 - Mikrotvrdost

Mikrotvrdost materiálů			
Materiál		Za sucha [HV]	Procesní kapalina [HV]
1	A	15,540 ± 1,810	19,120 ± 1,220
	B	18,840 ± 2,110	18,460 ± 1,740
	C	16,330 ± 1,590	20,960 ± 1,540
	D	17,560 ± 1,740	18,860 ± 2,210
	E	17,230 ± 2,020	19,570 ± 1,960
	<b>Arit. pr.</b>	<b>17,100 ± 1,120</b>	<b>19,390 ± 0,860</b>
2	A	17,860 ± 3,040	16,220 ± 0,490
	B	17,440 ± 3,700	20,100 ± 3,270
	C	17,020 ± 2,810	18,460 ± 1,550
	D	18,320 ± 3,210	17,630 ± 2,290
	E	17,570 ± 2,640	19,550 ± 2,440
	<b>Arit. pr.</b>	<b>17,640 ± 0,430</b>	<b>18,390 ± 1,380</b>
3	A	23,480 ± 2,440	22,240 ± 0,820
	B	19,080 ± 3,390	24,020 ± 4,670
	C	21,470 ± 2,970	24,750 ± 4,330
	D	22,390 ± 2,020	23,120 ± 2,610
	E	20,880 ± 2,370	22,370 ± 2,110
	<b>Arit. pr.</b>	<b>21,460 ± 1,480</b>	<b>23,300 ± 0,960</b>
4	A	20,580 ± 1,740	24,440 ± 5,410
	B	20,800 ± 3,530	22,240 ± 2,540
	C	21,320 ± 2,490	25,020 ± 4,120
	D	19,820 ± 3,270	21,960 ± 3,780
	E	20,960 ± 2,980	22,880 ± 2,880
	<b>Arit. pr.</b>	<b>20,700 ± 0,500</b>	<b>23,310 ± 1,210</b>
5	A	18,860 ± 1,500	22,340 ± 4,100
	B	19,880 ± 2,730	21,120 ± 1,500
	C	18,070 ± 1,860	23,460 ± 4,230
	D	20,560 ± 2,810	20,790 ± 2,580
	E	19,400 ± 2,050	20,120 ± 3,240
	<b>Arit. pr.</b>	<b>19,350 ± 0,850</b>	<b>21,570 ± 1,190</b>
6	A	20,120 ± 2,300	20,440 ± 1,720
	B	21,100 ± 1,380	23,160 ± 2,610
	C	19,770 ± 2,610	21,130 ± 1,410
	D	22,330 ± 3,480	22,890 ± 2,220
	E	20,200 ± 1,860	21,460 ± 1,970
	<b>Arit. pr.</b>	<b>20,700 ± 0,920</b>	<b>21,820 ± 1,040</b>

Mikrotvrdost materiálů			
Materiál		Za sucha [HV]	Procesní kapalina [HV]
7	A	19,760 ± 2,690	23,940 ± 2,420
	B	20,820 ± 2,130	21,600 ± 1,690
	C	22,100 ± 3,020	22,080 ± 2,100
	D	19,310 ± 2,510	22,640 ± 2,330
	E	19,880 ± 2,790	23,840 ± 2,560
	Arit. pr.	<b>20,370 ± 0,990</b>	<b>22,820 ± 0,930</b>
8	A	17,560 ± 2,370	22,600 ± 2,130
	B	16,940 ± 1,620	23,220 ± 2,250
	C	17,060 ± 2,020	23,860 ± 2,670
	D	18,220 ± 2,670	22,220 ± 2,010
	E	16,880 ± 1,770	22,640 ± 2,550
	Arit. pr.	<b>17,330 ± 0,500</b>	<b>22,910 ± 0,570</b>
9	A	18,060 ± 0,650	20,680 ± 3,020
	B	19,380 ± 1,310	20,380 ± 1,120
	C	18,320 ± 0,980	19,870 ± 2,440
	D	20,240 ± 1,670	20,670 ± 2,890
	E	18,150 ± 0,770	21,110 ± 3,460
	Arit. pr.	<b>18,830 ± 0,850</b>	<b>20,540 ± 0,410</b>
10	A	22,860 ± 1,460	21,480 ± 3,980
	B	19,620 ± 1,490	21,020 ± 1,760
	C	21,640 ± 1,120	20,850 ± 2,770
	D	20,550 ± 2,290	22,130 ± 1,920
	E	21,330 ± 1,570	21,070 ± 1,550
	Arit. pr.	<b>21,200 ± 1,080</b>	<b>21,310 ± 0,460</b>
11	A	20,160 ± 1,310	25,960 ± 4,040
	B	22,660 ± 2,650	24,880 ± 2,670
	C	20,550 ± 1,590	26,170 ± 3,880
	D	21,860 ± 2,150	24,670 ± 3,270
	E	22,030 ± 2,370	25,330 ± 4,140
	Arit. pr.	<b>21,450 ± 0,940</b>	<b>25,400 ± 0,590</b>
12	A	23,640 ± 2,050	23,200 ± 1,390
	B	24,960 ± 3,000	24,620 ± 5,220
	C	25,260 ± 3,570	23,640 ± 2,610
	D	23,960 ± 2,280	25,120 ± 4,880
	E	24,220 ± 2,810	23,370 ± 1,890
	Arit. pr.	<b>24,410 ± 0,610</b>	<b>23,990 ± 0,750</b>

## Příloha 5 - Teplota při broušení

Teploty při broušení			
Materiál		Za sucha [°C]	Procesní kapalina [°C]
1	A	22,850 ± 0,230	18,050 ± 0,150
	B	22,900 ± 0,100	18,050 ± 0,150
	C	22,800 ± 0,150	18,100 ± 0,230
	D	22,850 ± 0,000	18,100 ± 0,000
	E	22,750 ± 0,230	18,050 ± 0,150
	Arit. pr.	<b>22,830 ± 0,050</b>	<b>18,070 ± 0,020</b>
2	A	23,000 ± 0,000	18,000 ± 0,000
	B	22,900 ± 0,150	18,050 ± 0,100
	C	22,950 ± 0,150	18,050 ± 0,150
	D	23,000 ± 0,100	18,050 ± 0,150
	E	23,000 ± 0,230	18,050 ± 0,000
	Arit. pr.	<b>22,970 ± 0,040</b>	<b>18,040 ± 0,020</b>
3	A	24,900 ± 0,300	18,100 ± 0,300
	B	25,000 ± 0,230	18,100 ± 0,100
	C	24,950 ± 0,300	18,050 ± 0,100
	D	24,900 ± 0,100	18,050 ± 0,150
	E	24,850 ± 0,150	18,100 ± 0,230
	Arit. pr.	<b>24,920 ± 0,050</b>	<b>18,080 ± 0,020</b>
4	A	21,700 ± 0,460	18,000 ± 0,000
	B	21,700 ± 0,150	17,950 ± 0,100
	C	21,750 ± 0,230	18,000 ± 0,100
	D	21,650 ± 0,230	18,000 ± 0,150
	E	21,750 ± 0,460	18,050 ± 0,000
	Arit. pr.	<b>21,710 ± 0,040</b>	<b>18,000 ± 0,030</b>
5	A	23,150 ± 0,230	18,100 ± 0,300
	B	23,100 ± 0,150	18,100 ± 0,150
	C	23,100 ± 0,150	18,150 ± 0,230
	D	23,150 ± 0,100	18,100 ± 0,150
	E	23,150 ± 0,230	18,050 ± 0,100
	Arit. pr.	<b>23,130 ± 0,020</b>	<b>18,100 ± 0,030</b>
6	A	22,100 ± 0,200	18,050 ± 0,150
	B	22,000 ± 0,150	18,100 ± 0,100
	C	22,050 ± 0,230	18,100 ± 0,150
	D	22,050 ± 0,150	18,050 ± 0,100
	E	22,100 ± 0,100	18,050 ± 0,100
	Arit. pr.	<b>22,060 ± 0,040</b>	<b>18,070 ± 0,020</b>

Teploty při broušení			
Materiál		Za sucha [°C]	Procesní kapalina [°C]
7	A	23,000 ± 0,000	18,200 ± 0,330
	B	23,050 ± 0,100	18,150 ± 0,150
	C	23,050 ± 0,000	18,200 ± 0,330
	D	23,000 ± 0,100	18,200 ± 0,230
	E	22,950 ± 0,150	18,200 ± 0,150
	Arit. pr.	<b>23,010 ± 0,040</b>	<b>18,190 ± 0,020</b>
8	A	22,200 ± 0,240	18,000 ± 0,000
	B	22,100 ± 0,150	18,000 ± 0,100
	C	22,200 ± 0,100	18,050 ± 0,150
	D	22,200 ± 0,100	18,050 ± 0,100
	E	22,150 ± 0,150	18,000 ± 0,000
	Arit. pr.	<b>22,170 ± 0,040</b>	<b>18,020 ± 0,020</b>
9	A	21,200 ± 0,400	18,000 ± 0,000
	B	21,200 ± 0,150	18,050 ± 0,100
	C	21,150 ± 0,230	18,000 ± 0,100
	D	21,150 ± 0,300	18,050 ± 0,000
	E	21,200 ± 0,150	18,000 ± 0,150
	Arit. pr.	<b>21,180 ± 0,020</b>	<b>18,020 ± 0,020</b>
10	A	21,500 ± 0,320	18,150 ± 0,230
	B	21,550 ± 0,150	18,150 ± 0,150
	C	21,550 ± 0,230	18,150 ± 0,150
	D	21,500 ± 0,150	18,200 ± 0,100
	E	21,450 ± 0,100	18,150 ± 0,230
	Arit. pr.	<b>21,510 ± 0,040</b>	<b>18,160 ± 0,020</b>
11	A	22,050 ± 0,150	19,050 ± 0,150
	B	22,000 ± 0,100	19,000 ± 0,150
	C	22,000 ± 0,230	19,050 ± 0,100
	D	22,100 ± 0,100	19,050 ± 0,230
	E	22,050 ± 0,150	19,100 ± 0,150
	Arit. pr.	<b>22,040 ± 0,040</b>	<b>19,050 ± 0,030</b>
12	A	22,500 ± 0,000	18,050 ± 0,150
	B	22,500 ± 0,100	18,050 ± 0,100
	C	22,550 ± 0,000	18,000 ± 0,150
	D	22,500 ± 0,150	18,050 ± 0,100
	E	22,500 ± 0,100	18,050 ± 0,230
	Arit. pr.	<b>22,510 ± 0,020</b>	<b>18,040 ± 0,020</b>



## Příloha 6 - Součinitel teplotní roztažnosti

SOUČINITEL TEPLITNÍ ROZTAŽNOSTI					
Vzorek		Po obvodu		Po tloušťce	
		Za sucha [ $\mu\text{m}/(\text{m}^{??})$ ]	Procesní kapalina [ $\mu\text{m}/(\text{m}^{??})$ ]	Za sucha [ $\mu\text{m}/(\text{m}^{??})$ ]	Procesní kapalina [ $\mu\text{m}/(\text{m}^{??})$ ]
1	A	57,114	56,334	55,484	57,256
	B	56,881	56,414	55,517	57,101
	C	57,211	56,242	55,314	57,313
	D	57,254	56,312	55,128	57,241
	E	56,902	56,401	55,502	57,355
	Arit. pr.	<b>57,072 ± 0,155</b>	<b>56,341 ± 0,063</b>	<b>55,389 ± 0,150</b>	<b>57,253 ± 0,086</b>
2	A	56,228	57,661	53,880	58,474
	B	55,981	57,414	53,502	58,914
	C	56,331	57,848	54,141	58,323
	D	56,025	57,669	53,921	58,118
	E	56,369	57,692	54,019	58,402
	Arit. pr.	<b>56,187 ± 0,158</b>	<b>57,657 ± 0,139</b>	<b>53,893 ± 0,215</b>	<b>58,446 ± 0,262</b>
3	A	18,352	19,225	20,226	20,847
	B	19,011	19,427	20,118	20,998
	C	18,102	19,202	20,331	21,102
	D	18,221	19,187	20,287	20,612
	E	18,005	19,220	20,189	20,805
	Arit. pr.	<b>18,338 ± 0,356</b>	<b>19,252 ± 0,088</b>	<b>20,230 ± 0,074</b>	<b>20,873 ± 0,168</b>
4	A	53,387	54,112	53,111	54,920
	B	54,107	54,551	53,454	55,128
	C	53,008	54,097	52,887	54,612
	D	53,128	53,892	53,163	55,228
	E	53,331	54,080	53,033	54,821
	Arit. pr.	<b>53,392 ± 0,383</b>	<b>54,146 ± 0,217</b>	<b>53,130 ± 0,187</b>	<b>54,942 ± 0,219</b>
5	A	49,817	50,212	49,232	50,844
	B	50,134	49,878	49,337	50,888
	C	49,662	50,336	49,025	50,627
	D	49,542	50,320	49,328	51,025
	E	49,869	50,441	49,232	50,802
	Arit. pr.	<b>49,805 ± 0,201</b>	<b>50,237 ± 0,194</b>	<b>49,231 ± 0,112</b>	<b>50,837 ± 0,129</b>
6	A	49,621	49,814	48,877	50,232
	B	49,402	49,617	48,629	50,022
	C	49,484	50,119	48,822	50,136
	D	49,920	50,088	49,111	50,427
	E	49,690	49,717	49,001	50,303
	Arit. pr.	<b>49,623 ± 0,179</b>	<b>49,871 ± 0,200</b>	<b>48,888 ± 0,164</b>	<b>50,224 ± 0,139</b>

SOUČINITEL TEPLOTNÍ ROZTAŽNOSTI					
Vzorek		Po obvodu		Po tloušťce	
		Za sucha [μm/(m??)]	Procesní kapalina [μm/(m??)]	Za sucha [μm/(m??)]	Procesní kapalina [μm/(m??)]
7	A	48,053	47,889	48,569	48,241
	B	47,892	47,669	48,102	48,534
	C	48,117	47,928	48,982	48,025
	D	48,098	47,518	48,774	48,178
	E	48,136	48,105	48,502	48,202
	Arit. pr.	<b>48,059 ± 0,088</b>	<b>47,822 ± 0,206</b>	<b>48,586 ± 0,295</b>	<b>48,236 ± 0,166</b>
8	A	45,712	46,202	45,992	45,898
	B	45,602	45,971	45,785	46,217
	C	45,888	46,387	45,983	45,802
	D	45,774	45,867	46,104	45,628
	E	45,618	46,402	46,088	46,023
	Arit. pr.	<b>45,719 ± 0,105</b>	<b>46,166 ± 0,216</b>	<b>45,990 ± 0,114</b>	<b>45,914 ± 0,199</b>
9	A	44,012	43,817	44,841	43,221
	B	44,089	43,458	44,517	43,429
	C	44,131	43,625	44,929	43,144
	D	43,739	44,102	45,106	43,001
	E	44,055	44,058	44,802	43,288
	Arit. pr.	<b>44,005 ± 0,139</b>	<b>43,812 ± 0,247</b>	<b>44,839 ± 0,192</b>	<b>43,217 ± 0,143</b>
10	A	42,330	42,559	42,775	43,114
	B	42,447	42,414	42,928	43,228
	C	42,252	42,785	42,888	43,391
	D	42,514	42,488	42,521	43,022
	E	42,202	42,524	42,709	42,941
	Arit. pr.	<b>42,349 ± 0,117</b>	<b>42,554 ± 0,125</b>	<b>42,764 ± 0,145</b>	<b>43,139 ± 0,158</b>
11	A	39,553	40,115	40,259	40,445
	B	39,104	39,882	40,357	40,132
	C	39,454	40,333	39,982	40,662
	D	39,924	40,175	40,440	40,697
	E	39,656	39,990	40,302	40,387
	Arit. pr.	<b>39,538 ± 0,268</b>	<b>40,099 ± 0,155</b>	<b>40,268 ± 0,155</b>	<b>40,465 ± 0,205</b>
12	A	37,449	36,868	38,116	37,125
	B	37,692	36,458	37,882	37,184
	C	37,144	36,992	38,330	36,882
	D	37,572	37,110	38,259	37,290
	E	37,388	36,921	37,912	37,201
	Arit. pr.	<b>37,449 ± 0,185</b>	<b>36,870 ± 0,221</b>	<b>38,100 ± 0,180</b>	<b>37,136 ± 0,138</b>